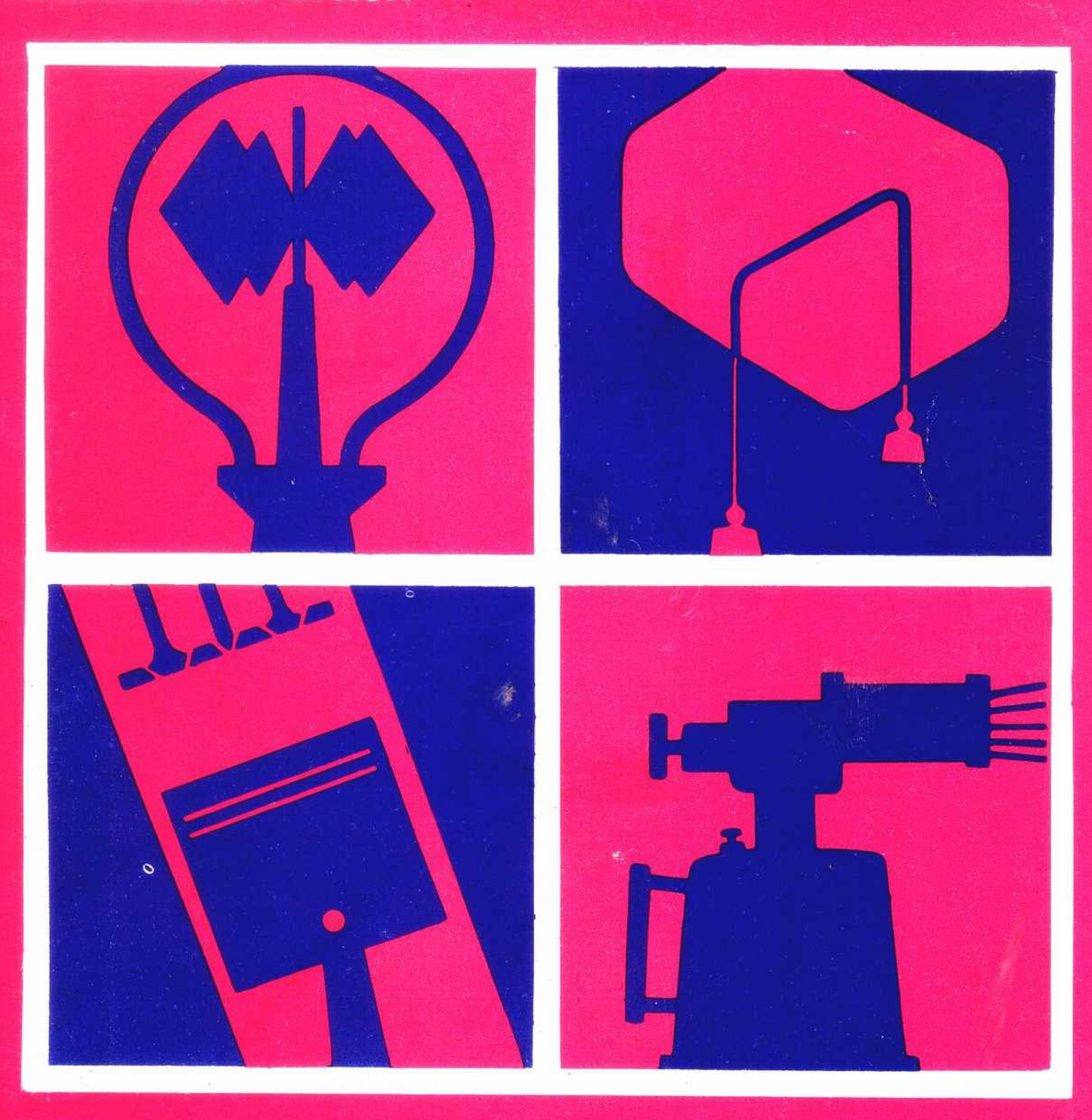
EL MUNDO DEL CALOR

ALEXANDER EFRON



S. A. EDITORIAL BELL



ALEXANDER EFRON
ING. EN ELECTRICIDAD, DR. EN FISICA
EX PRESIDENTE DEL DEPARTAMENTO
DE FISICA DE LA ESCUELA SUPERIOR
STUYVESANT NUEVA YORK.

EL MUNDO DEL CALOR

TRADUCCION DEL LIBRO
"EXPLORING HEAT"
REALIZADA POR
ING. JAIME LAFULLA

S. A. EDITORIAL



SANTANDER 735
BUENOS AIRES

Título de la versión original inglesa, impresa en los Estados Unidos de Norteamérica: EXPLORING HEAT of Alexander Efron E. E., Ph. D.

Tarjeta de Catálogo en la Biblioteca del Congreso de los Estados Unidos Nº 69-19519

HECHO EL DEPOSITO QUE
MARCA LA LEY 11723

Distribuidores exclusivos en España
EDICIONES TECNICAS MARCOMBO S. A.

IMPRESO EN LA ARGENTINA
PRINTED IN ARGENTINA

ESTE LIBRO SE TERMINO DE IMPRIMIR EL DIA 26 DE JULIO DE 1971, EN LOS TALLERES GRAFICOS DE SEBASTIAN DE AMORRORTU E HIJOS, LUCA 2223, BUENOS AIRES.
171-31

Introducción

El calor, su concepto, sus teorías y principios básicos, es una de las piedras angulares de la física clásica. Este enfoque clásico debe, no obstante, completarse con los últimos adelantos tecnológicos registrados en el campo de las máquinas térmicas, así como debe ampliarse su contenido teórico a fin de incluir las leyes fundamentales de la termodinámica, indispensables para comprender el funcionamiento de esas máquinas. Este libro satisface esas necesidades y logra un equilibrio conveniente entre la teoría y la práctica.

El Capítulo 1 pone de relieve la evolución histórica del pensamiento acerca de la naturaleza del calor, haciendo notar particularmente la diferencia entre calor y temperatura tal como se concebía antiguamente y el punto de vista que de ello tenemos ahora. Se define el calor como "energía interna en tránsito" y la temperatura como nivel de potencial relacionado con aquélla. En el Capítulo 2 se estudia la medición de cantidades de calor en calorías y kilocalorías, como también en unidades térmicas inglesas, forma que se encuentra frecuentemente en la tecnología moderna. Trata también este capítulo del calor específico y capacidad calorífica, así como de los fundamentos de los intercambios de calor. El Capítulo 3 vuelve a referirse a la naturaleza general del calor, estudiándose con detalle los procesos de transmisión del calor, sus leyes fundamentales y la noción de "portadores de calor". El Capítulo 4 se dedica a exponer los principios que rigen los cambios de estado, su utilización en los casos de intercambio de calor, la licuación de gases y la nueva rama de la física denominada "criogena". Finalmente, el Capítulo 5 reúne todos los temas estudiados para examinar las máquinas térmicas, los principios de su funcionamiento y sus problemas termodinámicos fundamentales. Trátase, entre estas máquinas, de las turbinas de vapor y de reacción, los motores de gasolina y Diesel, las turbohélices, los estatorreactores y los cohetes.

En el texto se emplean con frecuencia diagramas de nivel de potencial (Capítulos 1 al 4). La utilización de esquemas y análisis gráficos en todos los casos de flujo de calor (Capítulos 2 y 4) es otro procedimiento destinado a aclarar principios y consolidar su comprensión.

La Hayden Modern Physics Series (Serie de Física Moderna de Hayden) a la cual pertenece el presente volumen, brinda una reseña rigurosamente exacta pero al mismo tiempo muy accesible de los campos más importantes de la física.

INDICE GENERAL

EL CALOR Y SUS CONCEPTOS FUNDAMENTALES

1

1 EVOLUCION HISTORICA

El actual punto de vista que considera al calor como una forma de energía mecánica, es relativamente nuevo. Se creía anteriormente que toda substancia contenía un fluido llamado *calórico,* opinión expresada primeramente por José Black en 1750. De acuerdo a ello, se suponía que, a medida que los cuerpos calientes se enfriaban, perdían parte de su calórico; al calentarse, volvían a absorber el calórico. Los sustentadores de esta teoría podían explicar cierto número de procesos caloríficos, como los que tienen lugar en recipientes donde hay intercambio de calor (calorímetros) pero hallaban dificultad para dar razón de otros. (Se sostenía, por ejemplo, que la dilatación era consecuencia de la pretendida propiedad de "auto-repulsión" del calórico). En muchos aspectos, el calórico era tan misterioso como el *flogisto* que, se suponía, escapaba de los cuerpos al arder. El pensamiento científico del siglo XVIII estaba muy predispuesto hacia los "fluidos" y "humores". Aun hoy hablamos del *flujo* del calor y de la electricidad.

El Conde Rumford (Benjamín Thompson), científico anglo-americano, fue el primero que trató de refutar la teoría del calórico. Mientras supervisaba el taladrado de un cañón de bronce en el arsenal de Munich (1798), Rumford observó que era preciso añadir agua a la que se ponía en el alma del cañón para impedir su recalentamiento, puesto que se evaporaba al mantenerse en ebullición. Recordó que la teoría en boga podía explicar la producción de calor a partir de la liberación del fluido calórico de las partículas finamente divididas de bronce. Pero ¿cómo

explicar el desarrollo aparentemente ilimitado de calor cuando la herramienta taladradora, perdiendo el filo, no podía ya cortar el metal?

Rumford comprendió que la fuente de energía era el trabajo mecánico efectuado por la herramienta giratoria y el calor resultante era en esencia *la energía del movimiento interno desordenado del bronce a medida que la herramienta lo cortaba o simplemente lo rozaba.*

Este nuevo concepto, que sería más adelante la base de la *teoría cinética molecular del calor,* fue también confirmado por Sir Humphry Davy (1799) quien logró fundir dos bloques de hielo frotándolos entre sí dentro de un recipiente en el que se hizo el vacío y se lo mantenía a temperatura inferior a 0°C (punto normal de fusión del hielo). Los trabajos de Rumford y Davy carecían de precisión y no fue sino hasta mediados del siglo XIX que Hermann von Helmholtz y Roberto Mayer proporcionaron pruebas rigurosas del calor como forma de energía y Sir Jaime Joule estableció *experimentalmente* la *equivalencia entre calor y trabajo mecánico,* contribuyendo a derribar la teoría del calórico. En el Capítulo 5 se estudiará detalladamente el experimento de Joule.

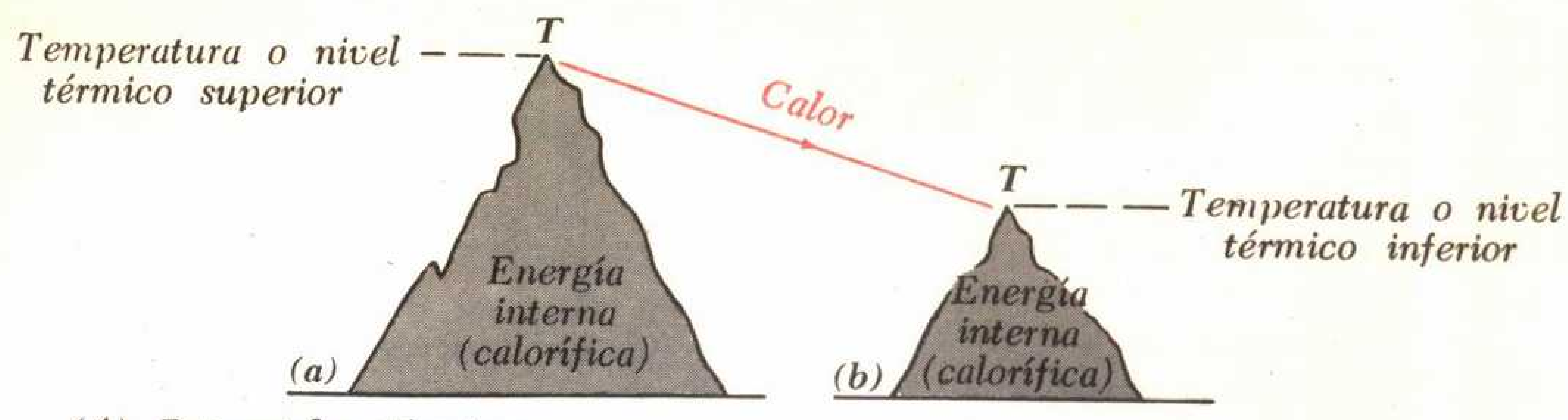
2 CALOR Y TEMPERATURA

El calor es en realidad una forma de energía *en tránsito.* Un cuerpo a temperatura elevada —condición que determina si el calor pasará hacia o desde el cuerpo— no contiene necesariamente gran cantidad de energía calorífica. Posee, en cambio, cierta cantidad de *energía interna,* poca o mucha, pero disponible a *nivel* o *potencial térmico* elevado (temperatura). Por el contrario, un cuerpo a menor temperatura puede o no contener menor cantidad de energía interna almacenada, pero el *nivel* de ésta es claramente inferior a la del primero. Poniendo ambos cuerpos en contacto térmico, el que está a mayor temperatura cederá parte de su energía interna (aunque puede que no tenga tanta como podría ceder), el de menor temperatura ganará dicha energía cedida, pudiéndose aplicar con propiedad la palabra *calor* únicamente a la *energía transferida en el proceso.* Debe observarse que la energía interna, de la que proviene el calor, es la suma de energías que poseen todas las moléculas que forman el cuerpo. En los gases monoatómicos, la suma total de estas energías se debe al movimiento de *traslación* o de vaivén de las moléculas. En las moléculas complejas, deben también tenerse en cuenta las energías de *rotación* y de *vibración.*

No siempre puede afirmarse que el calor puede apreciarse únicamente *en un intercambio térmico.* Por lo que hace a la sensación física, la palabra calor, aplicada a un sistema de cuerpos a la misma temperatura, carece de significado, quedando únicamente el concepto físico del mismo, o sea energía interna. No nos damos cuenta del "calor" cuando las condiciones son de *equilibrio térmico.* Únicamente si un cuerpo y un dispositivo sensible al calor (termómetro, o nuestros propios dedos) se encuentran en principio a temperaturas *diferentes,* es posible comprobar y medir (con precisión o aproximadamente) la transferencia de energía en forma de calor.

La palabra *temperatura* requiere todavía mayor análisis. La relacionamos generalmente con la *energía cinética media* de las moléculas de un cuerpo, cuando en realidad se refiere al *nivel* o *potencial* de la energía interna, de la misma manera que la *tensión eléctrica* debe considerarse como nivel alcanzado por esta forma de energía. El concepto de "niveles" o "crestas" (como también de "nodos" o "depresiones") se utilizará a menudo en el texto. Obsérvese la fig. 1-1, en la que se ha materializado el concepto de *"cresta" térmica,* representativo de temperatura, haciendo notar su correspondencia con el de *"cresta" de tensión.*

Las temperaturas varían desde el *cero absoluto* (−273,16°C, o −273°C prácticamente) correspondiente al punto de menor energía interna posible, hasta unos 10^{10} grados absolutos o Kelvin, temperatura reinante en el interior de las estrellas más calientes. El agua hierve a 373°K, mientras que la temperatura en la zona interior de la bomba de hidrógeno al es-



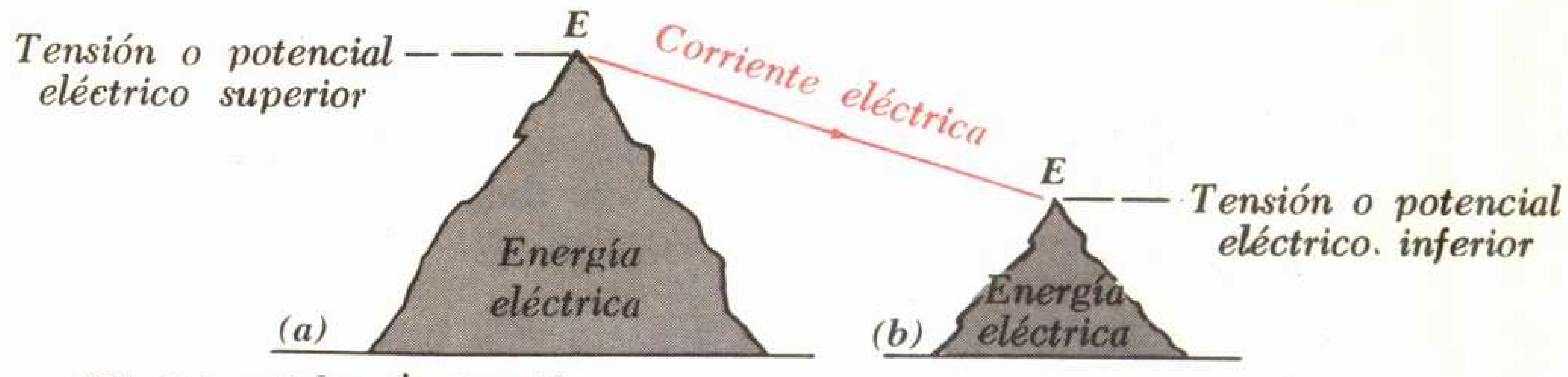


Fig. 1-1. Concepto de "nivel" o "potencial" en calor y electricidad. (A) Niveles térmicos: el calor circula desde (a) hacia (b), o desde un nivel T hacia otro inferior T. Esto ocurrirá aunque la energía interna de (a) sea menor que la de (b). (B) Niveles de tensión. La corriente circula desde (a) hacia (b) o desde un potencial E hacia otro menor E.

Tabla 1-1: ESPECTRO DE TEMPERATURAS EN GRADOS KELVIN

Bomba de fusión nuclear	10^8
Interior del sol	2×10^7
Bomba de fisión nuclear	10^6
Arco de plasma	5×10^4
Chispa eléctrica	2×10^4
Superficie del sol	6.000
Arco de carbón	5.000
Horno solar	4.000
Soplete oxiacetilénico	3.773
Soplete oxhídrico	3.073
Motor de combustión interna	3.000
Temperatura de fusión del hierro	1.808
Temperatura de fusión de la plata	1.234
Punto de ebullición del azufre	718
Punto de ebullición del agua	373
Punto de fusión del hielo	273
Punto de ebullición del aire líquido	81
Punto de ebullición del hidrógeno líquido	20,4
Punto de ebullición del helio líquido	4,2
Cero absoluto	0

tallar es de 10^8 (cien millones) grados K. En la Tabla 1-1 se detalla una amplia gama de temperatura, o *espectro térmico.* Poco más adelante se estudiará el significado exacto de la escala Kelvin o absoluta.

3 FUENTES CALORIFICAS

Cualquier clase de energía puede transformarse en energía interna. Esta a su vez es fuente de energía calorífica que puede dirigirse hacia los cuerpos que la rodean, si están más fríos. La energía eléctrica, mecánica, radiante, química y nuclear puede transformarse en calorífica y dentro de ciertos límites, también es cierta la recíproca.

Coloquemos un clavo sobre un yunque, martillándolo repetidamente. El clavo se calentará sensiblemente, apreciado al tacto. El mismo resultado se obtendrá frotando enérgicamente una moneda contra un papel de lija. En estos experimentos desarrollamos *energía mecánica* que aumenta la energía interna de los cuer-

pos, experimentando, a su contacto, la sensación de calor.

Encendamos un mechero Bunsen o un soplete oxiacetilénico. La combustión transforma la *energía química* del combustible en *energía interna* de la llama; calor que cede a los cuerpos más fríos que la rodean. Piense el lector cuál es la fuente de la cual han obtenido su energía química todos los combustibles naturales. O bien la fuente de energía de los alimentos que utilizamos para obtener el calor de nuestro cuerpo.

Un medio fácil de producir calor es hacer pasar una corriente eléctrica a través de una resistencia (conductor que dificulta el paso de aquélla). Como estudiaremos en otra oportunidad, la corriente eléctrica es el movimiento de electrones libres en un conductor metálico, o transferencia de cargas eléctricas. Esto aumenta la energía interna del conductor, que al perder este exceso por transmitirlo al ambiente más frío que lo rodea, origina un flujo calorífico. Las planchas eléctricas, tostadoras, cocinas y otros dispositivos producen de esta manera y con rapidez cantidades de calor fácilmente regulables. El costo del calor producido eléctricamente es superior al que resulta de la combustión directa. No será difícil al lector deducir por qué.

4 DILATACION DE LOS SOLIDOS

Comunicando calor a los cuerpos, generalmente se aumentan sus dimensiones. (Sin embargo, una banda de goma estirada se contrae al calentarla.) Calentando un alambre de hierro sobre la llama del Bunsen, por ejemplo, los átomos que lo forman se mueven cada vez más rápidamente, tomando de la llama, que a su vez es una masa de partículas en rápida vibración, la energía necesaria para ello. Antes de la acción de la llama, la vibración de los átomos del alambre se mantenía dentro de límites más reducidos. La aplicación del calor aumenta el alcance de esas *vibraciones térmicas,* dando por resultado que el alambre, como conjunto, se dilate según sus tres dimensiones. Análogamente, retirando la llama, los átomos disminuyen la extensión de su movimiento y el alambre se contrae. La variación de longitud de una barra al calentarse, se llama *dilatación lineal.* En realidad, también varía su superficie y volumen.

• **Experimento 1.** La fig. 1-2 representa un aparato destinado a comprobar la dilatación lineal. Un tubo metálico de 120 cm de longitud

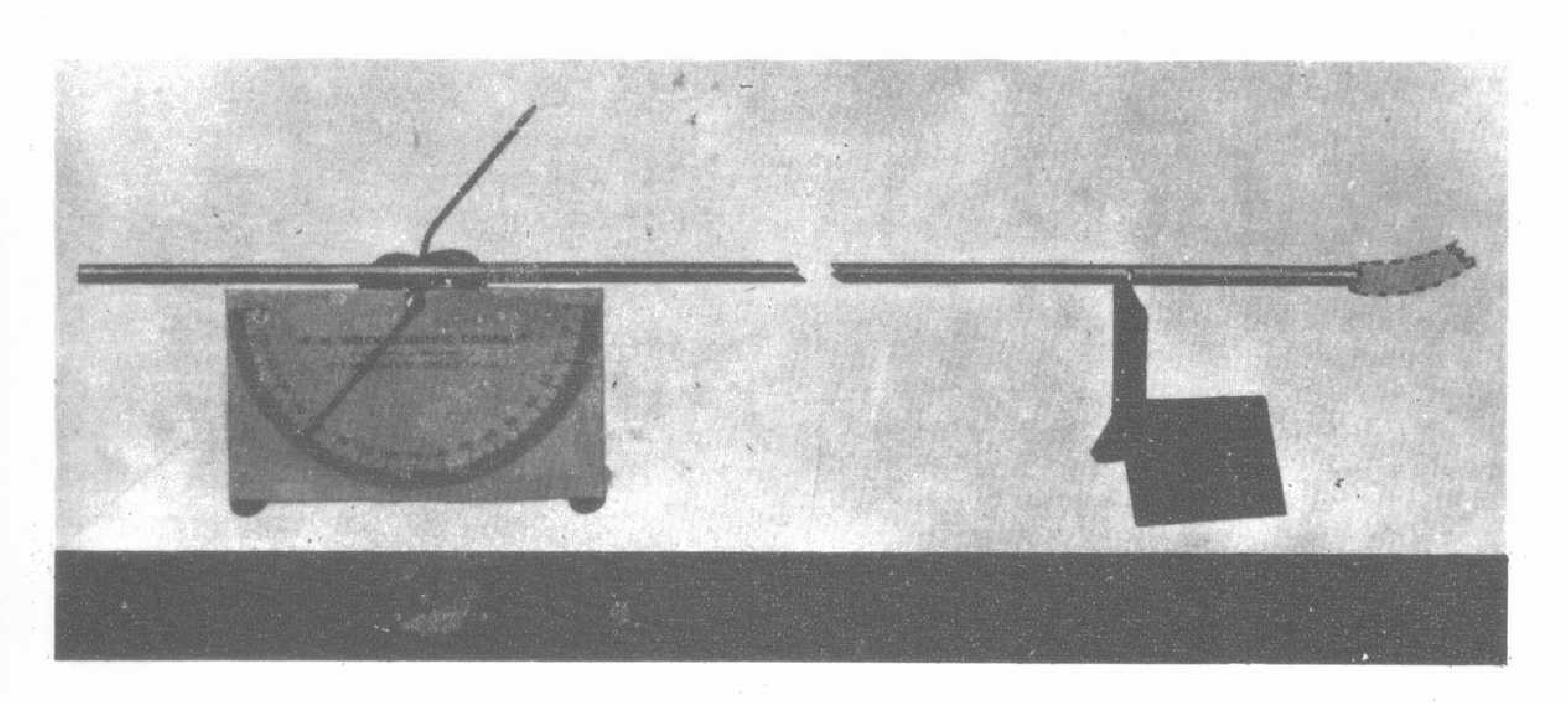


Fig. 1-2. Aparato de laboratorio para demostrar la dilatación lineal.

y 6 mm de diámetro se apoya, cerca de uno de sus extremos, en un soporte vertical; una ranura practicada en el mismo impide que pueda deslizarse más allá del

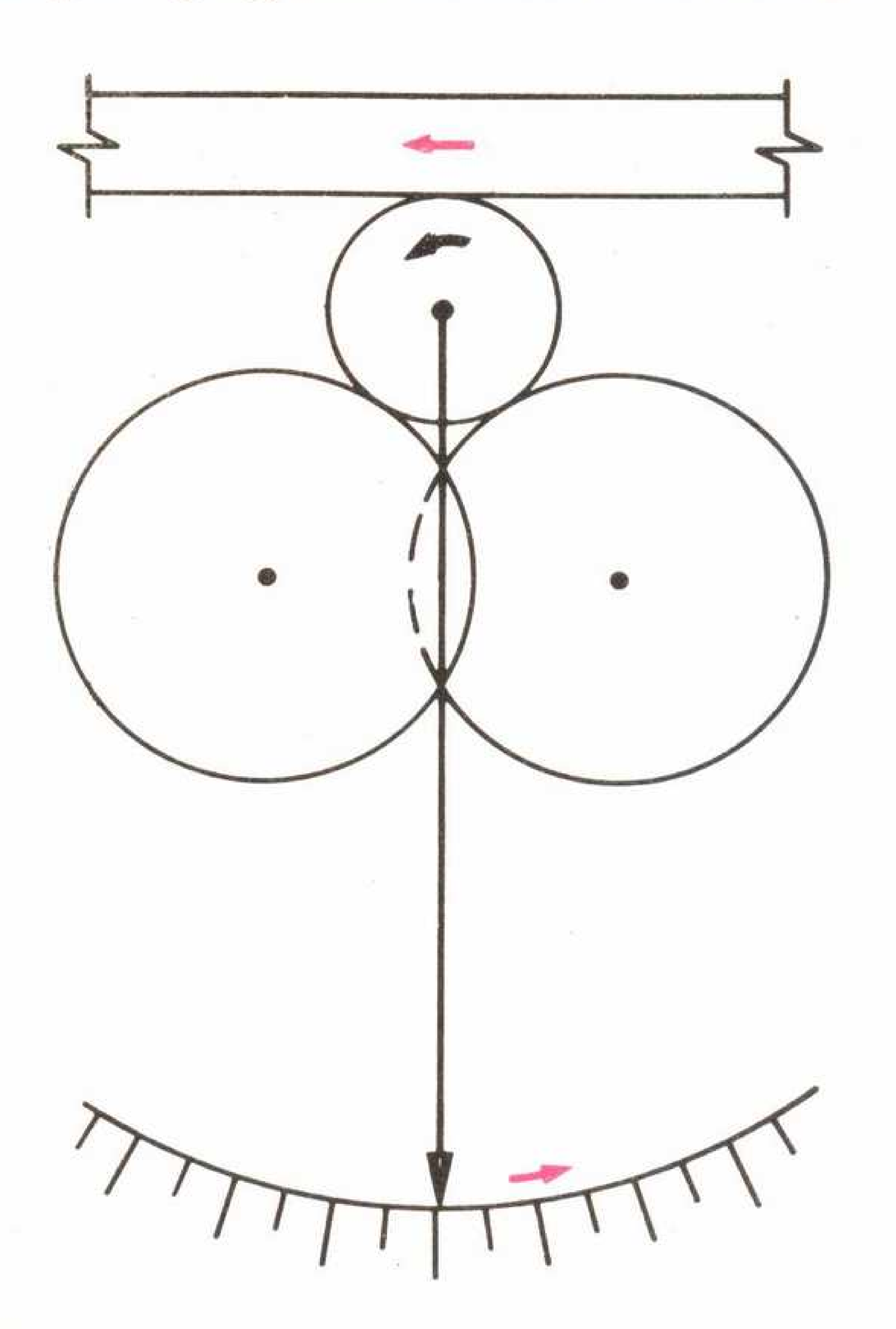


Fig. 1-3. Detalle del aparato demostrativo de la dilatación lineal.

punto prefijado. El otro extremo descansa sobre una pequeña varilla horizontal que gira sobre un sencillo sistema de rodillos cuando el tubo se dilata (fig. 1-3). La varilla transversal se ha doblado para formar una aguja indicadora que puede recorrer una escala de 180°. Se calienta el tubo haciendo pasar vapor por el mismo. Si el tubo es de aluminio, la aguja recorre unos 85° y 65° si es de latón. De esta manera se hace visible al observador un efecto que de otra manera pasaría inadvertido. El lector podrá tratar de explicar por qué es necesario amplificar el aumento de longitud que experimenta un sólido al dilatarse por el calor, para que pueda hacerse aparente a simple vista.

Del comportamiento de los tubos de aluminio y de latón, en el experimento anterior, deducimos que los diferentes cuerpos experimentan desigual incremento de longitud, o como se llama técnicamente, tienen diferente *coeficiente de dilatación lineal.* (En la sección 10 volveremos a referirnos a este tema.) Por ahora, estudiemos un dispositivo que utiliza directamente el efecto de la dilatación *diferencial* y se conoce con el nombre de *bimetal termostático.* Está formado por dos tiras de metales diferentes, soldadas, roblonadas o unidas entre sí (fig. 1-4) y se utiliza en los termómetros metálicos, termostatos para la regulación de temperaturas, avisadores de incendio y también en un "motor térmico" capaz de producir un esfuerzo de torsión.

Sometiendo el bimetal a una cierta temperatura, al dilatarse en mayor proporción el componente *A* (porque tiene mayor coeficiente de dilatación que *B*) hace curvar el conjunto de modo que *A* permanece en la parte exterior de la curva. Enfriando el dispositivo, la contracción mayor del componente *A* hace que el conjunto se curve también, pero ahora en sentido contrario, quedando *A* en el interior de la curva. A la temperatura

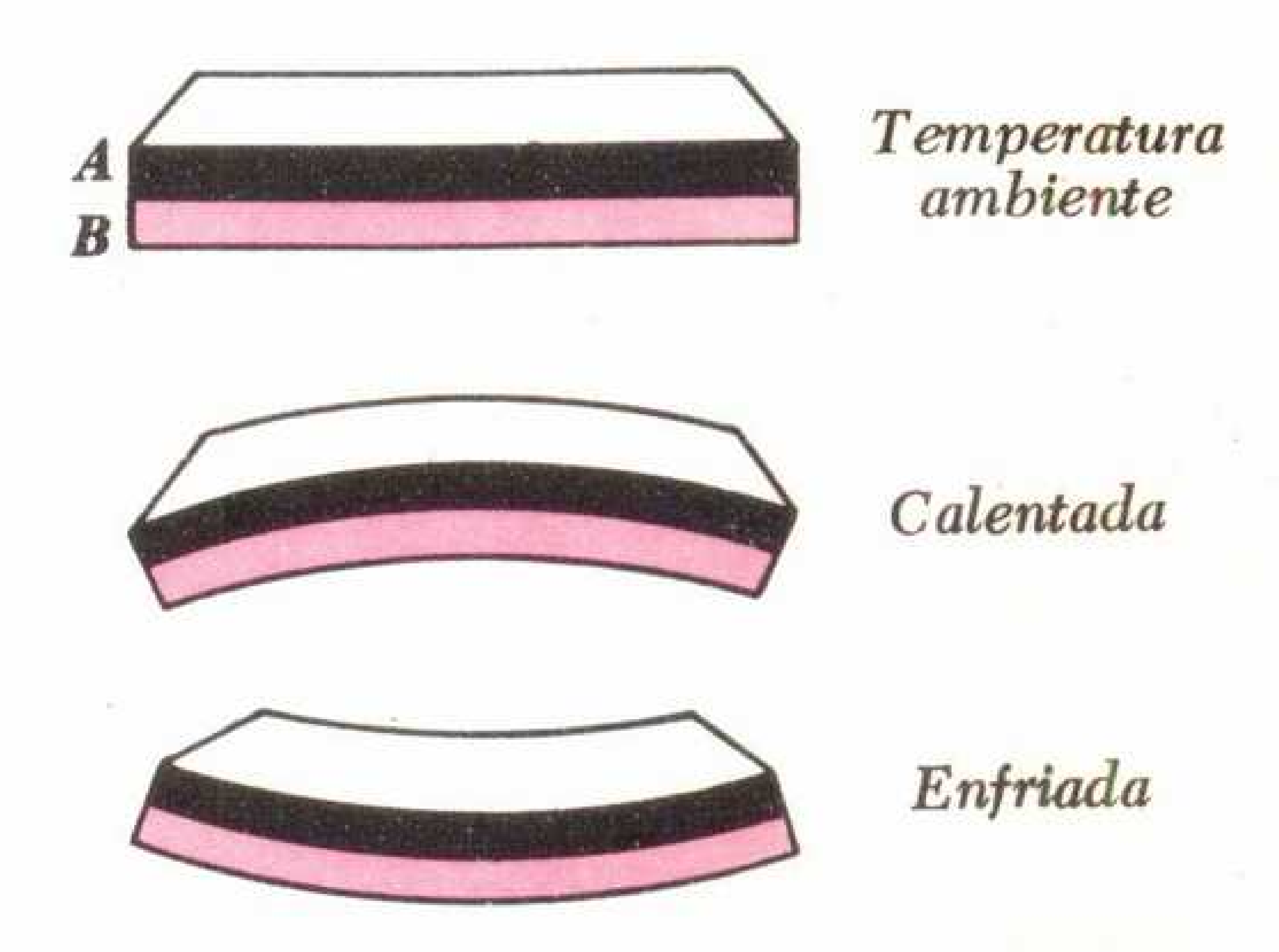


Fig. 1-4. Cinta bimetálica a tres temperaturas diferentes. (A tiene mayor coeficiente de dilatación que B).

ambiente, el bimetal no presenta curvatura. El desplazamiento transversal del extremo libre del conjunto, al calentarse o enfriarse, es muy superior a la variación

de longitud que experimentaría aisladamente cada uno de los componentes. Una combinación de particular eficacia se forma mediante una tira de *Invar* (acero

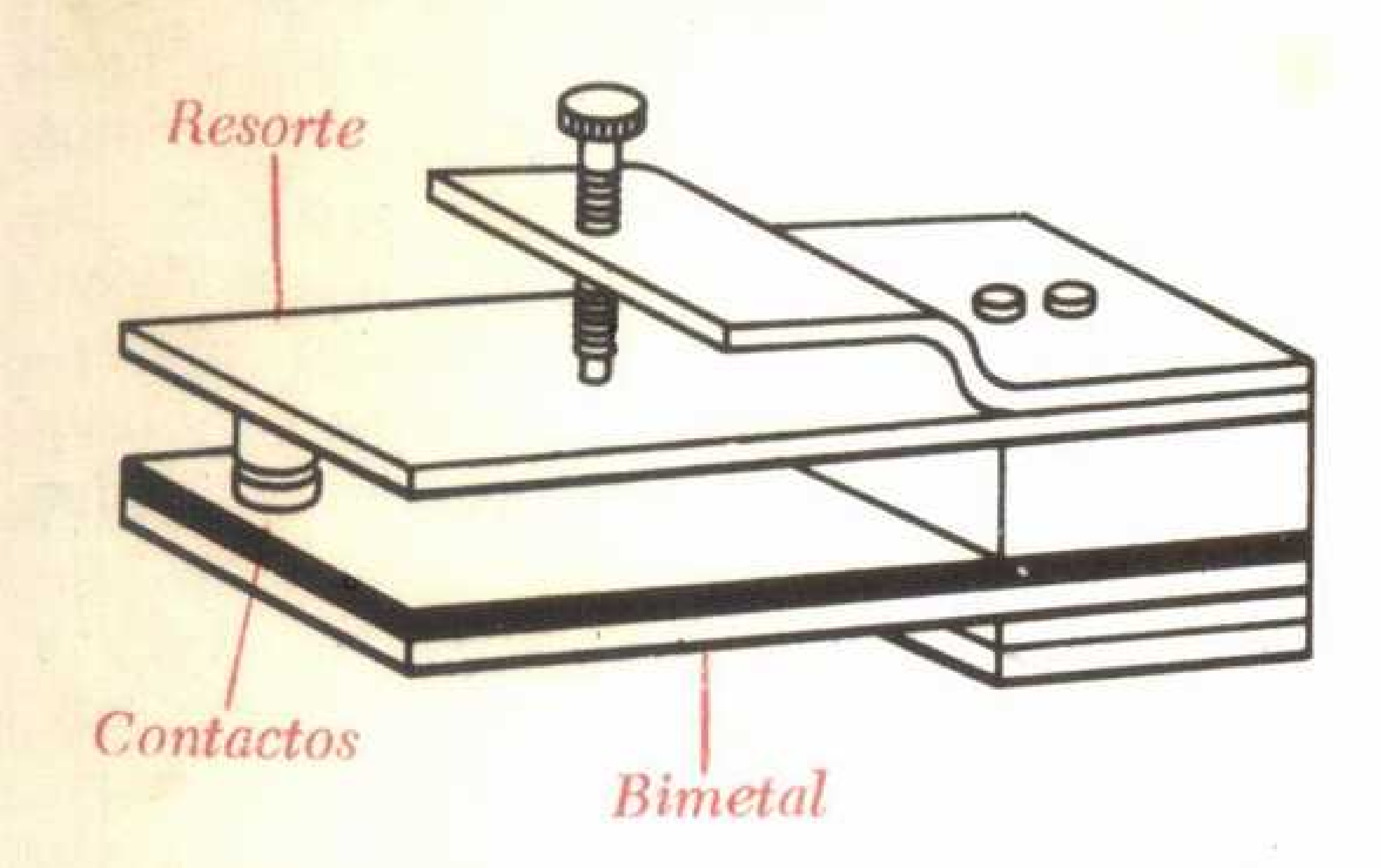


Fig. 1-5. Termostato sencillo, regulable.

con un 36 % de níquel, de muy pequeño coeficiente de dilatación) unida a otra de latón, de mucho mayor coeficiente de dilatación. La fig. 1-5 representa una lámina bimetálica formando parte de un termostato sencillo, regulable. En la fig. 1-6 se ve un elemento bimetálico arrollado en hélice, que forma parte de un termómetro inscriptor.

En ciertas aplicaciones, es necesario que los diferentes componentes de un dispositivo sometido a la acción del calor posean un coeficiente de dilatación casi idéntico. En una lámpara eléctrica de in-

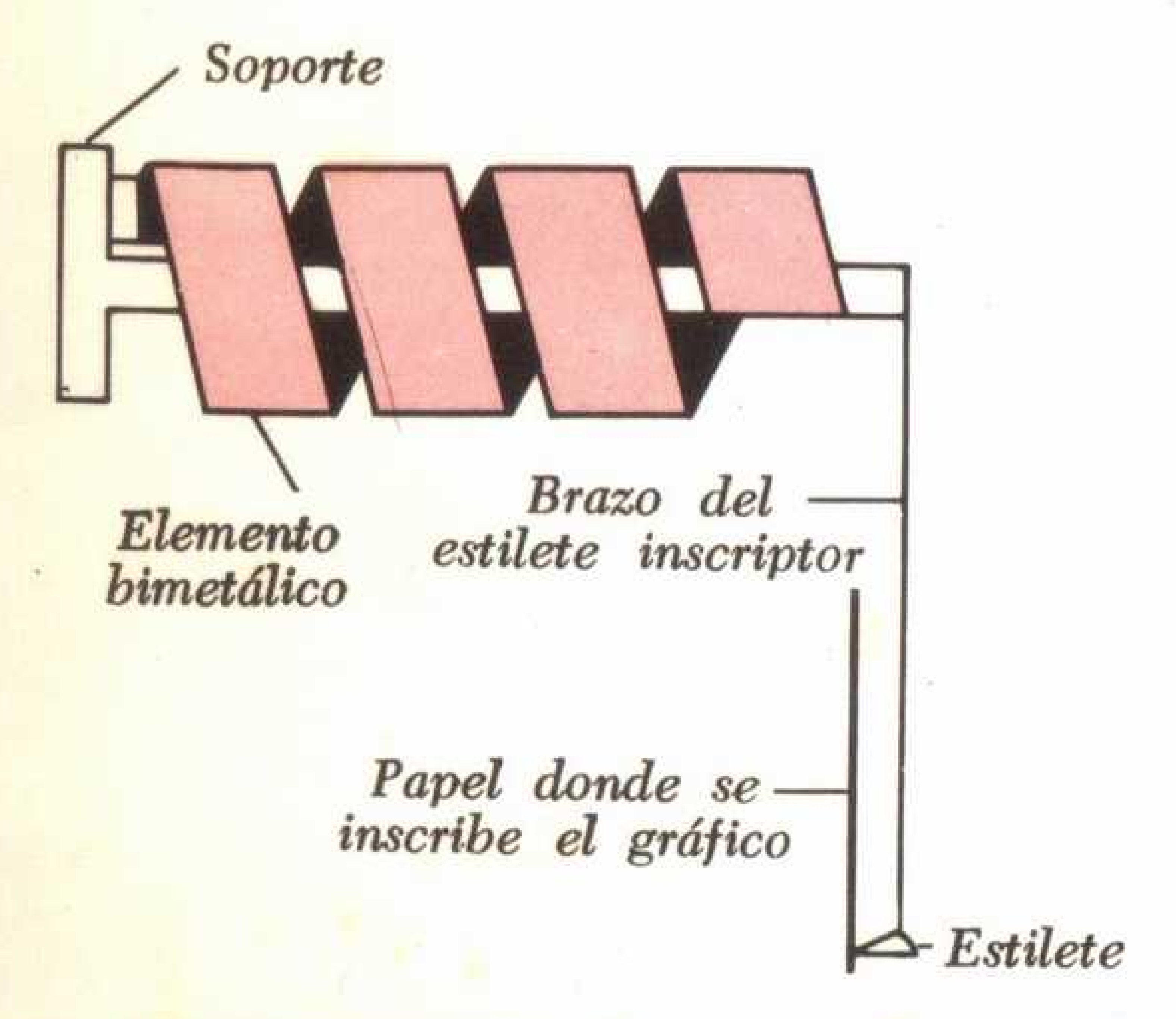


Fig. 1-6. Elemento bimetálico arrollado en hélice, que acciona el dispositivo inscriptor de un termógrafo.

candescencia, los conductores que penetran en el interior, atravesando el vidrio prensado en caliente, se hacen de una aleación de 42 % de níquel y 58 % de hierro, cuyo coeficiente de dilatación es muy parecido al del vidrio. Esta aleación se usa para el vidrio de bajo punto de fusión; para las juntas de cerámica o vidrio de alto punto de fusión, la aleación empleada contiene 28 % de níquel, 54 % de hierro y 18 % de cobalto.

5 FATIGAS TERMICAS

En una varilla metálica empotrada por ambos extremos, se desarrollarán tensiones considerables si se la somete a grandes variaciones de temperatura. Estas tensiones pueden someter al metal a fatigas superiores a su límite de elasticidad, siendo su ruptura una posibilidad real. Para impedirlo, se disponen *juntas de dilatación* (en forma de U) en los tubos de vapor de mucha longitud y también por el mismo motivo se deja un pequeño espacio entre las secciones de un pavimento de concreto que forma la calle o la acera.

Echando agua hirviente en un vaso de vidrio de paredes gruesas, la parte interior y la exterior experimentan dilataciones desiguales que ocasionan tensiones que pueden romper el vidrio. El vidrio "pyrex", borosilicato doble de sodio y aluminio, tiene poco coeficiente de dilatación térmica, lo que reduce al mínimo aquellas tensiones. Hay componentes de vajilla hechos de materiales resistentes a la llama, que pueden utilizarse sin peligro sobre el fuego de una cocina de gas. En la fig. 1-7 puede verse una prueba efectuada en condiciones todavía más severas, ya que comprende simultáneamente el brusco calentamiento y enfriamiento de un plato de vidrio con un contenido de sílice de 96 %. Se ve el momento en que dentro del mismo se vierte acero fundido, mientras el fondo descansa sobre un bloque de hielo. El cuarzo, que es sílice pura (anhídrido silícico) resistiría aún más, puesto que su coeficiente de dilatación es prácticamente nulo.



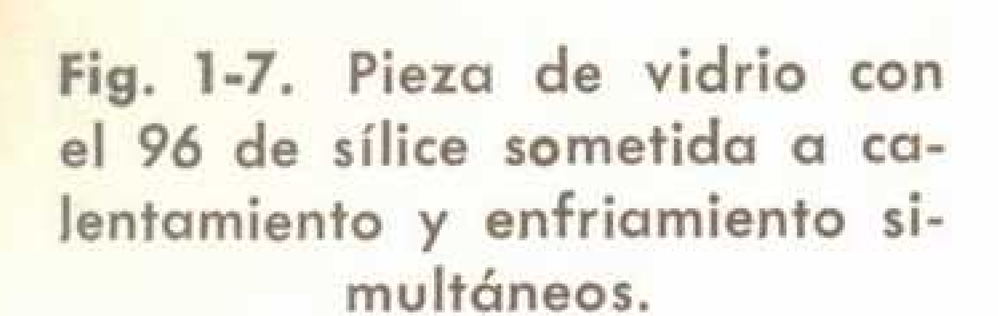


Fig. 1-7. Pieza de vidrio con el 96 de sílice sometida a calentamiento y enfriamiento simultáneos.

6 DILATACION DE LIQUIDOS Y GASES

La dilatación de los líquidos es superior a la de la mayoría de los sólidos, puesto que aquéllos se caracterizan por su menor cohesión molecular. Sin embargo, también en este caso es preciso amplificar la dilatación verdadera para que pueda observarse fácilmente a simple vista.

• **Experimento 2.** En la fig. 1-8 se ve un matraz de gran tamaño, completamente lleno de agua coloreada. Está cerrado mediante un tapón de goma atravesado por un tubo de vidrio de poco diámetro y bastante longitud. Parte del líquido pasa al tubo, que llena hasta cierto nivel, por encima del tapón. Calentando el matraz mediante la llama de un Bunsen, se observará una inconfundible elevación del líquido a lo largo del tubo, si bien al principio podrá observarse en realidad una disminución en el nivel. Trate el lector de hallar el motivo.

Como en el caso de sólidos diferentes, la dilatación de los líquidos también varía notablemente. El alcohol se dilata mucho más que el agua, que a su vez lo hace más que el mercurio (fig. 1-9). La dilatación exacta de un líquido (también

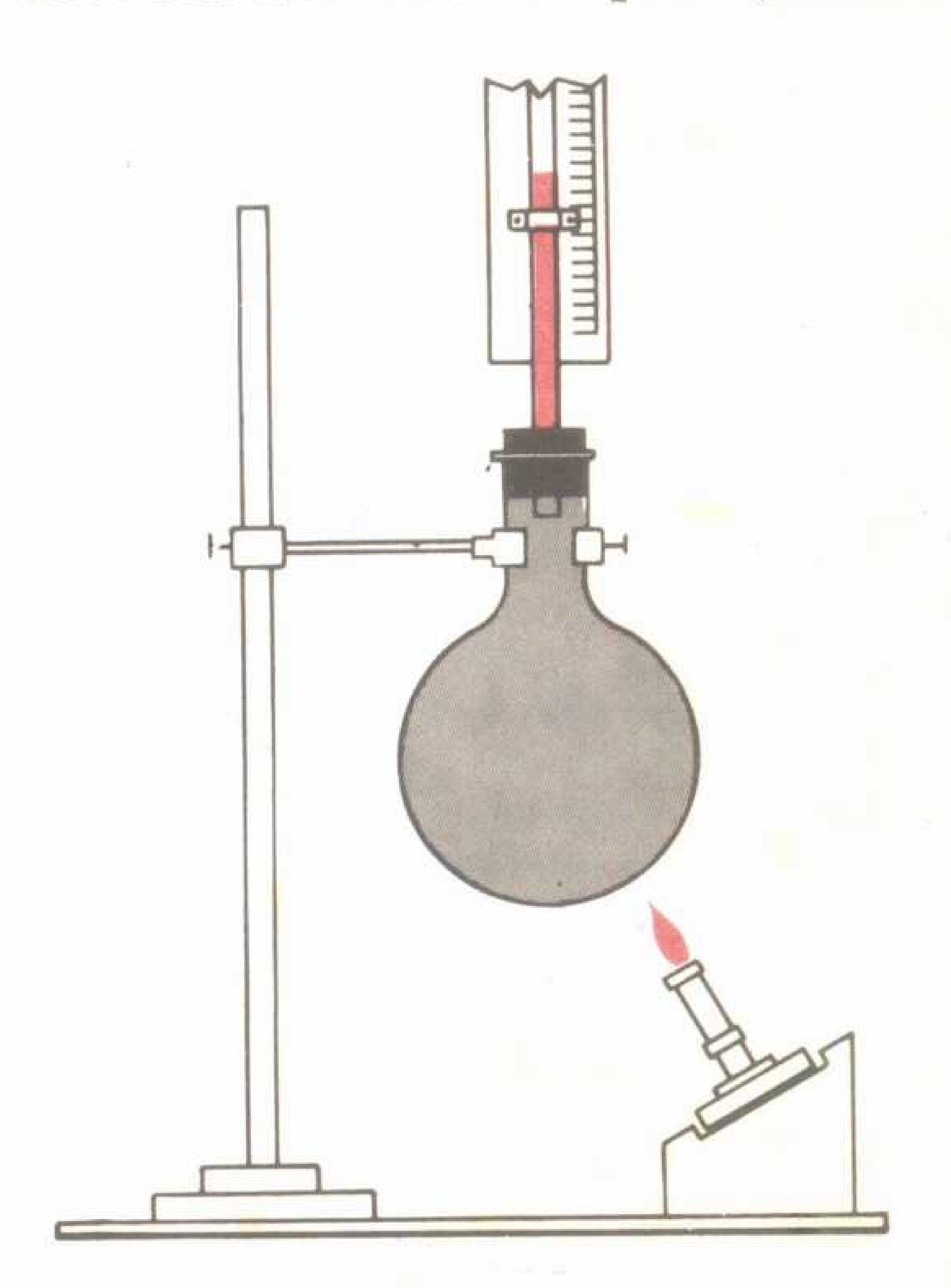


Fig. 1-8. Dilatación del agua.

la de un sólido) depende frecuentemente de los límites de temperatura entre los que tenga lugar la dilatación. El agua, por ejemplo, entre 0°C y 4°C, disminuye realmente de volumen al aumentar la temperatura, presentando en consecuencia un coeficiente negativo de dilatación dentro de dicho intervalo de temperaturas. Al sobrepasar los 4°C, la dilatación del agua es casi lineal (fig. 1-10).

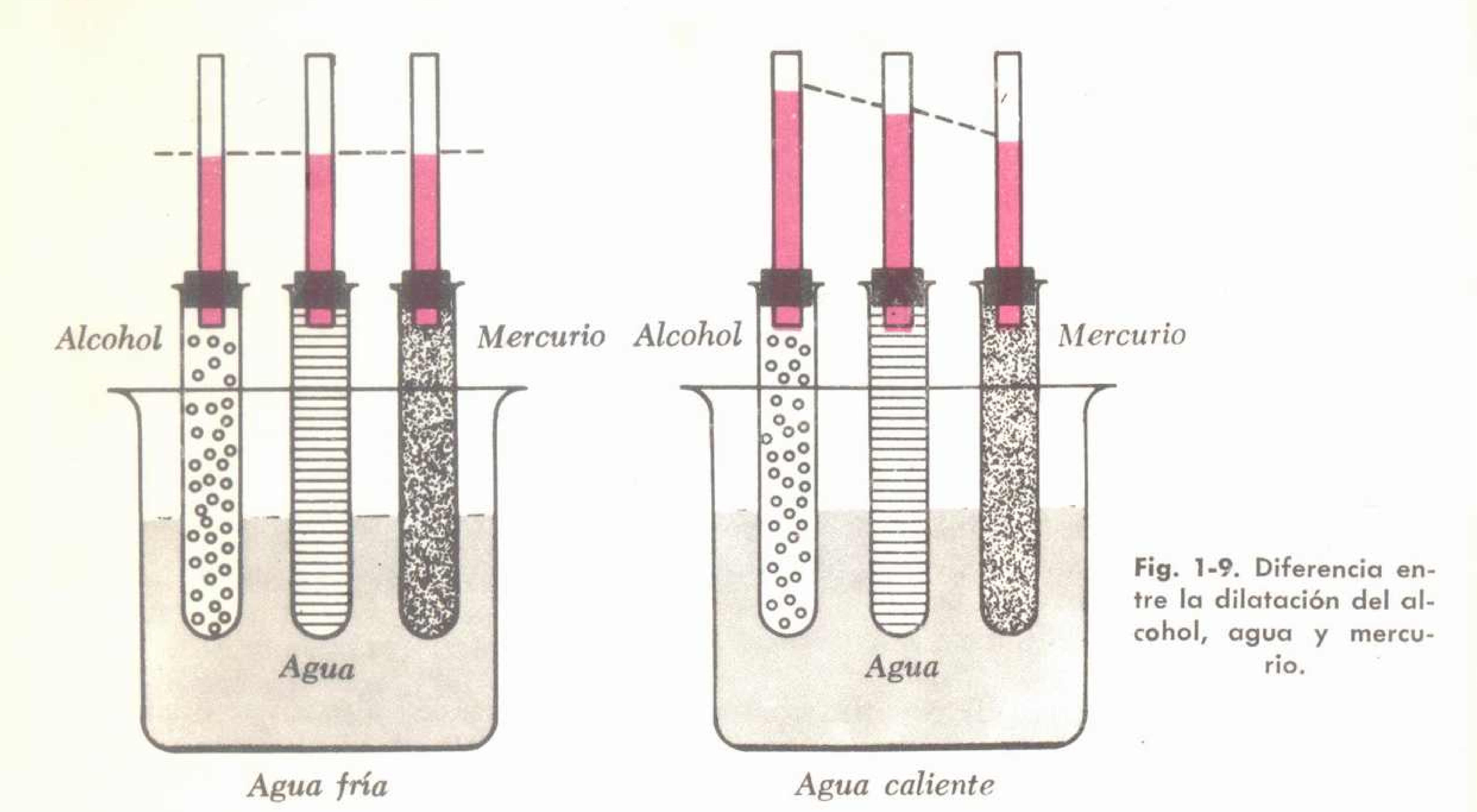


Fig. 1-9. Diferencia entre la dilatación del alcohol, agua y mercurio.

Volúmenes en cm³ por gramo de agua
1.006
1.005
1.004
1.003
1.002
1.001
1.000
0 2 4 6 8 10 12 14
Temperaturas (grados C)

Fig. 1-10. Dilatación irregular del agua.

Los gases se dilatan mucho más que los líquidos y que los sólidos. Además, como veremos en la sección 10, el coeficiente de dilatación cúbica tiene casi el mismo valor para todos los gases. La razón evidente de la gran dilatación térmica de los gases reside en su poca cohesión molecular.

• **Experimento 3.** La fig. 1-11 representa un matraz, *A*, lleno de aire, cerrado mediante un tapón de goma atravesado por un delgado tubo de vidrio *T*. Se sostiene el matraz de modo que el tubo quede sumergido en el agua coloreada de una cubeta, *B*. Se enfría primeramente el matraz para permitir la contracción del aire que contiene, con la consiguiente disminución de presión. La presión atmosférica, superior a la que reina en el interior del matraz, hará subir cierta cantidad de agua a lo largo del tubo *T*. Alcanzado ya un nivel fijo en el tubo, está listo para utilizar el *termómetro de aire* que acabamos de construir. Incluso un ligero calentamiento del matraz hará descender notablemente el nivel de agua en el tubo *T*.

El termómetro de aire no es instrumento en el que se pueda confiar, puesto

que acusa variaciones de la presión atmosférica al mismo tiempo que las de temperatura. Lo ideó Galileo Galilei en 1593, habiéndole dado el nombre de *termoscopio*. Volveremos a hablar de la dilatación de los gases al final de este capítulo, al estudiar este fenómeno en forma cuantitativa o matemática.

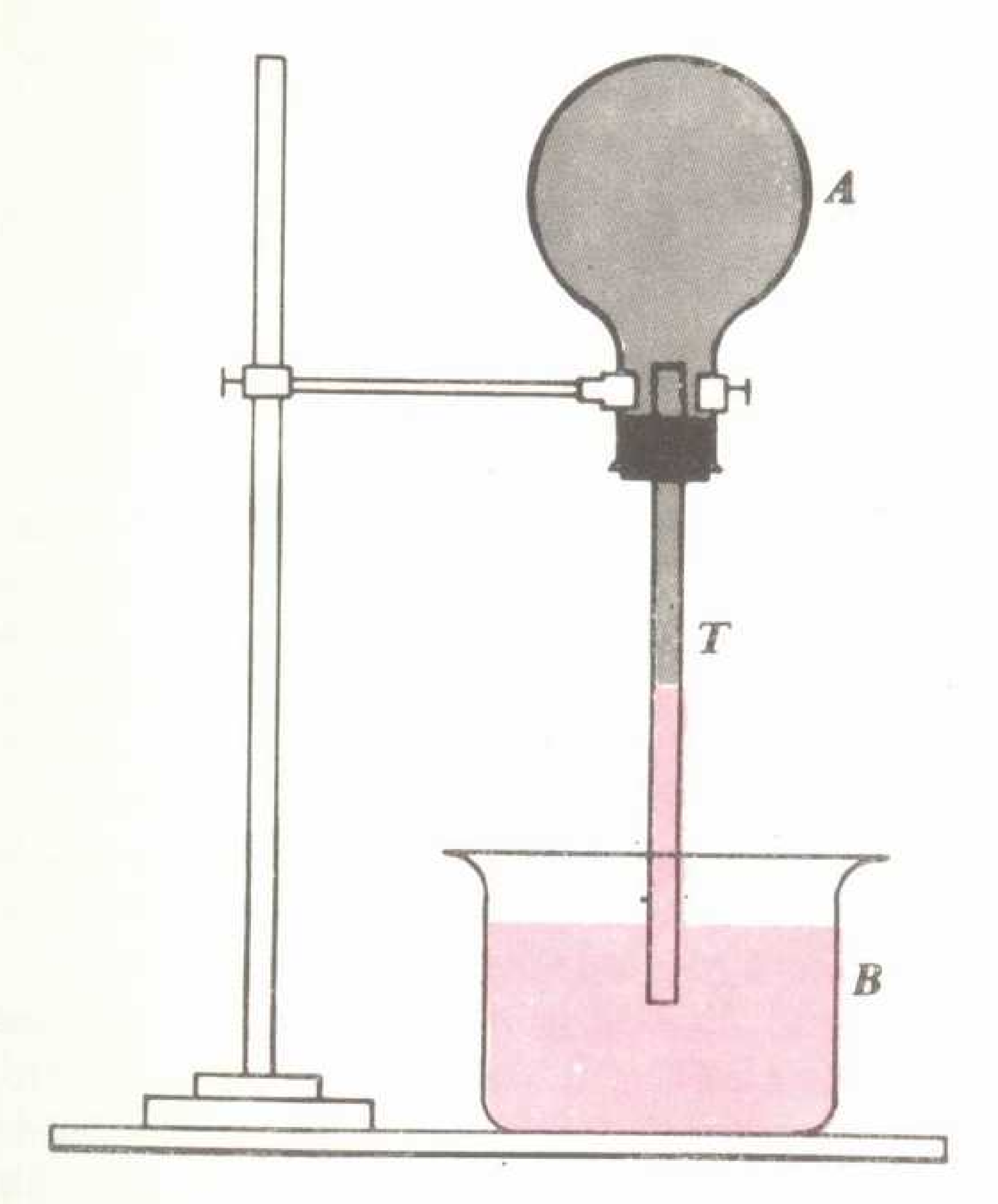


Fig. 1-11. Sencillo termómetro de aire (termoscopio).

7 TERMOMETRO DE LIQUIDO EN RECIPIENTE DE VIDRIO

Un método elemental y poco seguro para apreciar temperaturas moderadas, podría consistir en utilizar nuestros propios dedos como elementos sensibles. La sensación resultante se transmite al cerebro en forma de corriente nerviosa, dándonos idea de lo caliente que se encuentra el cuerpo y también, por razones de seguridad, cuándo debemos retirar el dedo tan ligero como sea posible.

De la imprecisión de esta clase de "termómetro" podemos hacernos cargo mediante una sencilla prueba. Sumerjamos en agua caliente un dedo de la mano izquierda y en agua helada uno de la mano derecha. Pongamos ahora los dos dentro de agua tibia. Esta misma agua parecerá fría al dedo de la mano izquierda y caliente para el de la derecha. Podría suponerse que la experiencia previa (memoria térmica) hace que el cerebro interprete de modo diferente dos sensaciones que por lo demás son idénticas.

Indudablemente, hace falta contar con algún método más objetivo para apreciar y medir temperaturas. El termómetro relaciona la temperatura con alguna propiedad física que varía continuamente y en forma conocida con la temperatura, variaciones que se pueden medir con precisión. Podemos utilizar con este propósito las variaciones de longitud de una delgada columna líquida, las variaciones de presión de un gas encerrado en un recipiente, las variaciones de la resistencia eléctrica de un conductor y también de un "termistor", semiconductor cuya conductibilidad depende de la temperatura, variaciones del color de un determinado compuesto químico, la variación de la radiación emitida por un cuerpo caliente y aún otras. Nos limitaremos en primer lugar al estudio del elemento termométrico formado por un líquido en recipiente de vidrio, que relaciona la temperatura con las variaciones de longitud de la columna termométrica.

El termómetro de mercurio ilustrado en la fig. 1-12, está formado por un depósito de vidrio de paredes delgadas unido a un tubo capilar de diámetro interior uniforme, cerrado por el otro etxremo. El depósito y parte del tubo están llenos de mercurio. En la porción que resta, se hace el vacío, generalmente, antes de cerrarlo. El tubo tiene directamente grabada, o en una escala aparte, montada detrás del mismo, las divisiones adecuadas (que estudiaremos en la próxima sección) para determinar la altura alcanzada por la columna líquida.

Al aumentar la temperatura del termómetro, se dilata el depósito, el tubo capilar y el mercurio contenido en ambos, pero éste se dilata más que aquéllos, por lo que el nivel del mercurio sube en el tubo. Si el capilar es de sección uniforme y el coeficiente de dilatación del líquido elegido es constante dentro del intervalo

de temperaturas que debe medir el termómetro, la longitud de la columna termométrica será *directamente proporcional* a la temperatura y la escala resultará *lineal.* (Los termómetros de líquido en recipien-

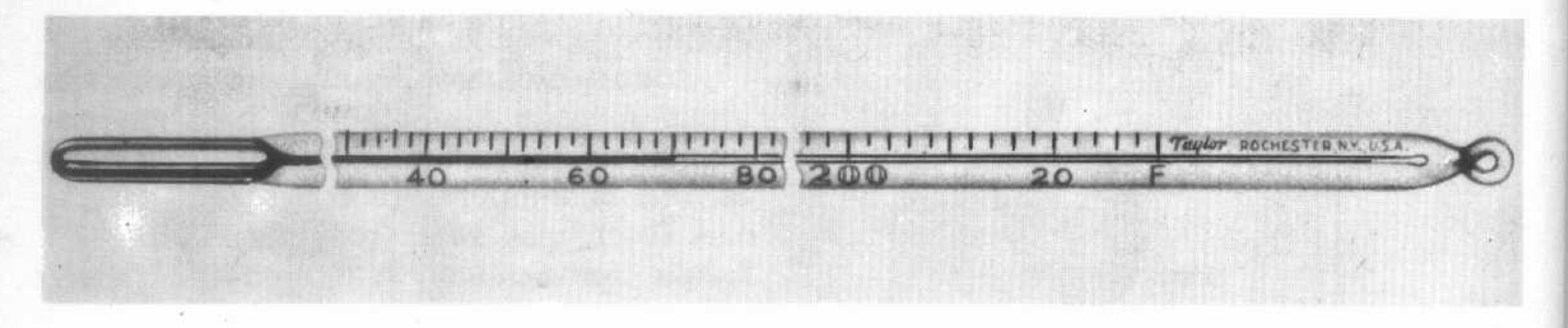


Fig. 1-12. Termómetro de líquido en recipiente de vidrio.

te de vidrio pueden perder esta proiedad debido al envejecimiento del vidrio y otros factores.) Para que la columna termométrica acuse una gran variación de longitud con respecto a un pequeño cambio de temperatura, es preciso que sea grande la relación entre el volumen del depósito y el volumen del capilar correspondiente a una división de la escala. Si se desea que el termómetro aprecie rápidamente una variación de temperatura, deberá ser grande la superficie del depósito.

El mercurio satisface los requisitos termométricos necesarios en general. Es fácilmente visible, se dilata y contrae casi uniformemente y permite la medición de temperaturas entre −39°C y 357°C, puntos de congelación y ebullición en condiciones normales, respectivamente. El límite superior puede hacerse llegar hasta unos 500°C llenando el espacio libre del tubo con algún gas inerte. La escala puede prolongarse hacia abajo mediante líquidos diferentes del mercurio. Así el alcohol permite medir temperaturas hasta −114°C y el pentano líquido hasta −200°C.

8 ESCALAS TERMOMETRICAS

Todo termómetro debe estar provisto de una escala calibrada, para que la lec-
sistema absoluto de unidades de medida

tura de la escala tenga significación determinada. La escala *Fahrenheit,* propuesta en 1724 por Gabriel Fahrenheit, se usa corrientemente en los países de habla inglesa y forma parte, en consecuencia, del

libra-pie-segundo, que en ellos se emplea. En casi todos los demás países y universalmente en los trabajos científicos, se utiliza la escala termométrica *centigrada* o de *Celsius,* ideada por el sueco Anders Celsius, en 1742. Es centigrada y se presta para los cálculos en los sistemas decimales *cgs* (centímetro-gramo-segundo) y *mks* (metro-kilogramo-segundo). En cada una de las dos escalas se encuentran dos *puntos* fijos o de referencia, asignándoseles valores arbitrarios a las temperaturas que representan. Así se determina la posición del punto cero y el valor de la unidad de temperatura. Se elijen como puntos fijos los correspondientes a la temperatura de congelación y de ebullición del agua.

La temperatura de referencia correspondiente al punto de fusión del hielo es la que tiene una mezcla de agua saturada de aire y hielo, a la presión atmosférica normal. La otra temperatura de referencia es la de ebullición del agua pura, también a la presión atmosférica normal (1 atmósfera, o 760 mm de mercurio). Recientemente se ha propuesto como punto fijo inferior el *punto triple* del agua (temperatura de equilibrio del hielo, agua y vapor de agua), cuyo valor se ha establecido en 0,01°C pero en obsequio a la sencillez, continuamos considerando como 0 y 100 los puntos fijos de la escala Celsius y 32 y 212 los de la escala Fahrenheit.

En la calibración de termómetros pa-

ra temperaturas elevadas (*pirómetros*) se emplean otros puntos fijos, entre los que pueden citarse el punto de ebullición del azufre (444,6°C), punto de fusión de la plata (960,8°C), punto de fusión del oro (1.063°C) y punto de fusión del tungsteno (3.370°C).

La longitud de la columna entre los puntos fijos superior e inferior de la escala Fahrenheit se divide en 180 partes iguales, cada una de las cuales representa un intervalo de temperatura igual a un grado Fahrenheit. Las divisiones o intervalos se prolongan tanto hacia abajo del punto señalado 32°F como hacia arriba del señalado 212°F. La misma columna puede dividirse en 100 partes iguales, cada una de las cuales representa entonces un intervalo de temperatura correspondiente a un grado Celsius. Como anteriormente, la escala se prolonga por debajo del punto 0°C y por encima del punto 100°C.

Siendo la misma longitud de columna que se divide sea en 180 o en 100 partes iguales, se deduce que el intervalo correspondiente a un grado Celsius representa un intervalo de temperatura igual a 180/100 o sea 9/5 de la escala Fahrenheit. Por análogo razonamiento, un grado Fahrenheit equivale a 5/9 de un grado Celsius. En la fig. 1-13 se representan los puntos fijos y dimensiones relativas de las escalas Fahrenheit y Celsius.

• **Problema 1.** Transformar el intervalo de temperaturas correspondiente a 18 grados F en su equivalente de la escala C.

Solución. 1 grado F $= 5/9$ grado C, luego 18 grados F equivaldrán a $18 \times 5/9 = 10$ grados C.

Veamos ahora cómo transformar temperaturas verdaderas, en lugar de intervalos de temperatura, de una a otra escala. Sea, por ejemplo, una temperatura de 50°C que representa un nivel de 50 grados (intervalos) de temperatura sobre el punto de fusión del hielo. El mismo nivel en la escala F, debe encontrarse $50 \times 9/5 = 90$ intervalos sobre el punto de fusión del hielo, que en esta escala tiene la marca 32. Luego 50°C equivalen a $90 + 32 = 122$°F.

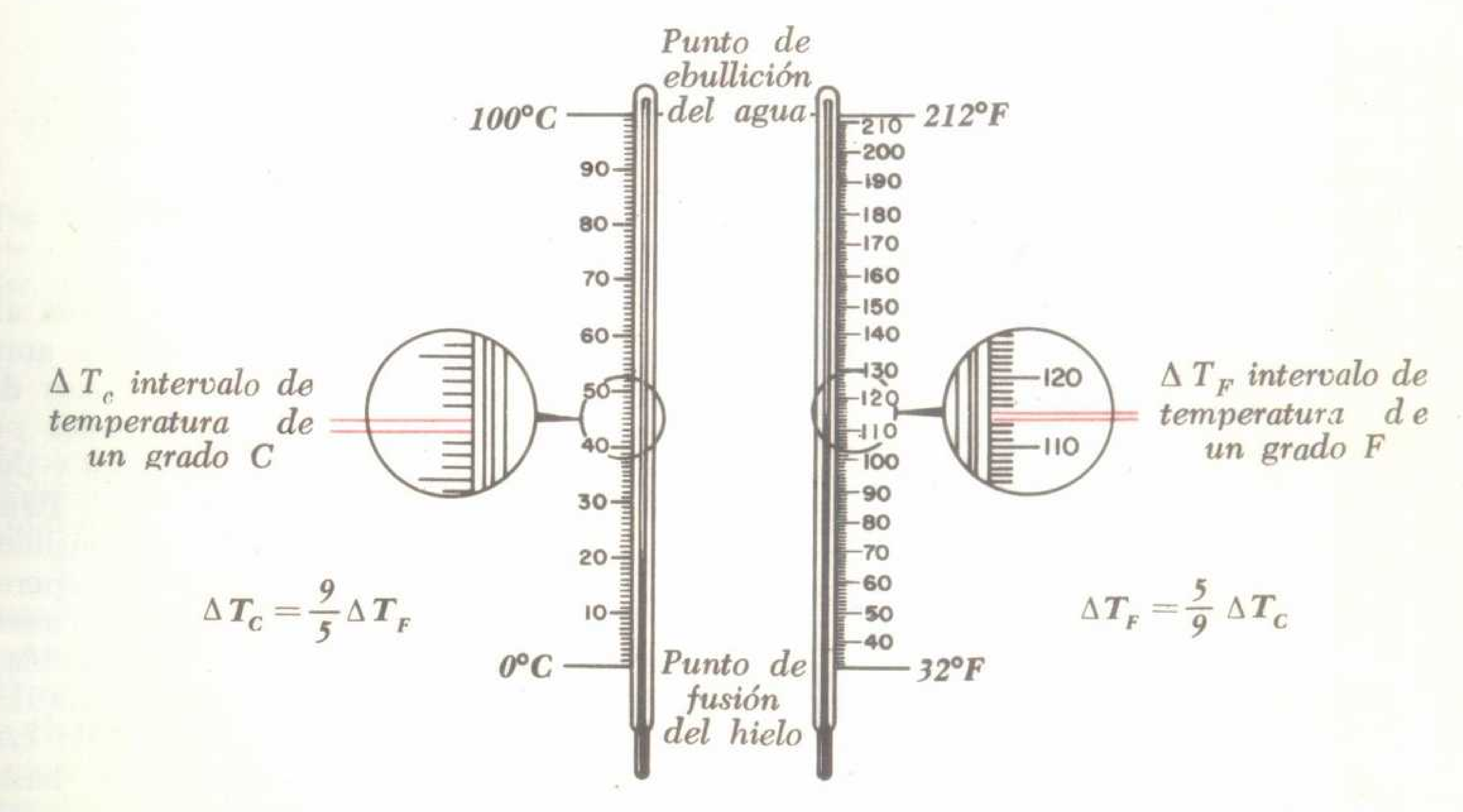


Fig. 1-13. Puntos fijos e intervalos de temperatura correspondientes a un grado en las escalas Celsius y Fahrenheit. Los símbolos Δ se refieren a intervalos de temperatura.

Como ejercicio, el lector podrá demostrar que son verdaderas las relaciones siguientes:

$$°F = 9/5\ °C + 32 \quad (1\text{-}1)$$

y

$$°C = 5/9\ (°F - 32) \quad (1\text{-}2)$$

• **Problema 2.** Convertir la temperatura −50°C en °F.

Solución. $°F = 9/5\ °C + 32 = 9/5 \times (-50) + 32 = -58°F$.

te a −460°F. Luego las temperaturas absolutas Fahrenheit, o de la escala *Rankine* (R), están 460° por encima de las señaladas en la escala F. Podemos expresar estas relaciones como sigue:

$$°K = °C + 273 \quad (1\text{-}3)$$

y

$$°R = °F + 460 \quad (1\text{-}4)$$

En la fig. 1-14 se han representado, una al lado de otra, las escalas Celsius, Fahrenheit, Kelvin y Rankine, permitiendo su comparación.

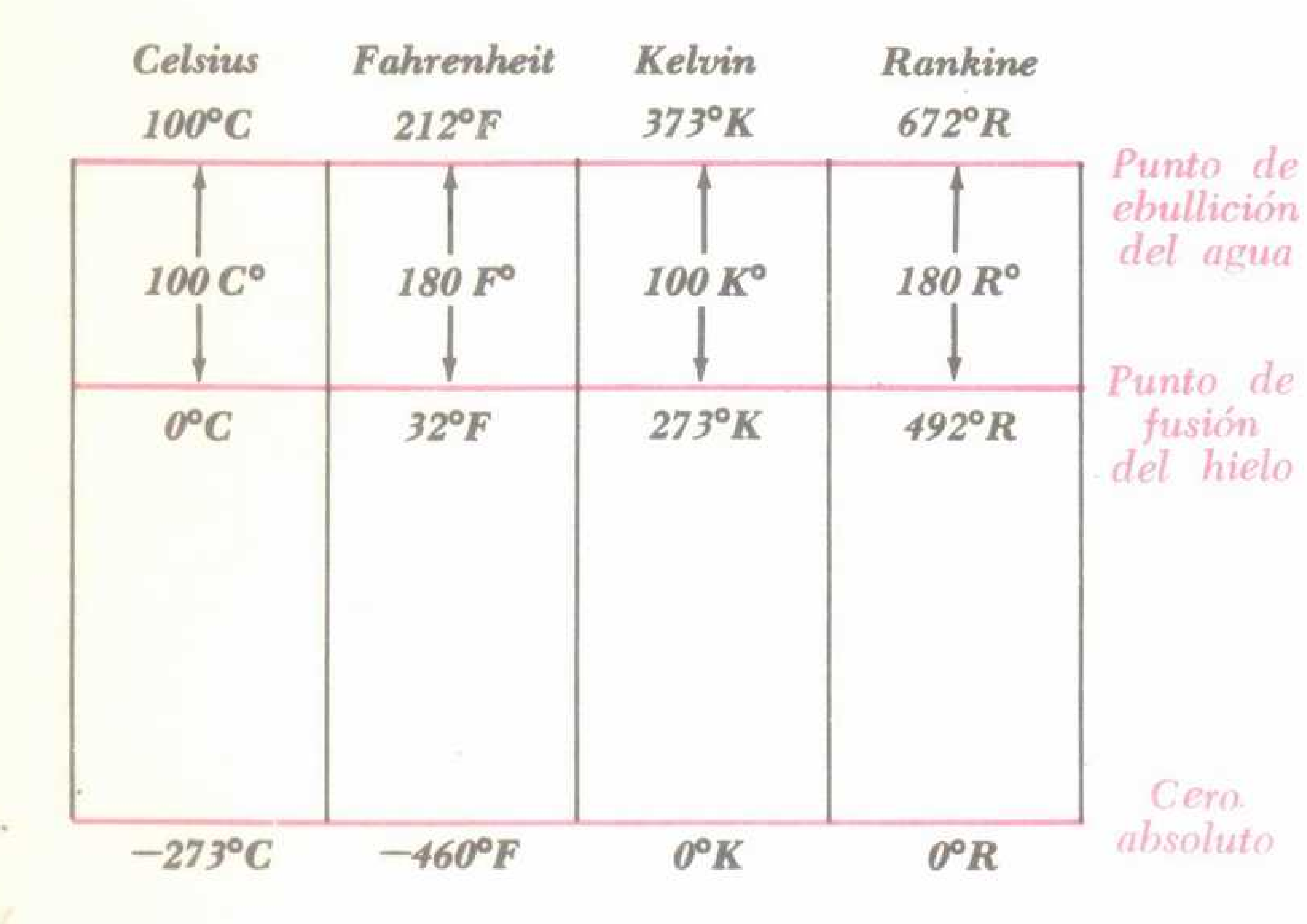


Fig. 1-14. Comparación de las escalas C, F, K y R.

Ya nos habíamos referido a la temperatura más baja que se puede obtener, como *cero absoluto*. Esta temperatura, cuyo valor es igual a −273,16°C o muy aproximadamente −273°C, es el punto cero de la escala llamada *Kelvin* o *absoluta*, establecida por Lord Kelvin fundándose en consideraciones *termodinámicas*. Las lecturas en esta escala son proporcionales a la energía cinética media del movimiento de traslación (de vaivén) de las moléculas. Las temperaturas de la escala Kelvin (K) se obtienen sumando 273° a las correspondientes en la escala Celsius, de modo que el punto de fusión del hielo es de 273°K y el de ebullición del agua, de 373°K. En la escala Fahrenheit, el cero absoluto equivale muy aproximadamen-

9 TERMOMETROS ESPECIALES

En la industria cerámica se miden altas temperaturas de manera sencilla aunque no muy precisa, mediante conos de diferentes puntos de fusión, llamados *pirómetros de fusión*, que se ablandan y doblan a determinadas temperaturas. Existen lápices, bolitas y pinturas sensibles que varían de color o funden a temperaturas preestablecidas. En ciertos casos, las variaciones de color son irreversibles, dejando un registro permanente de las temperaturas alcanzadas (fig. 1-15). Los pirómetros de fusión se utilizan hasta unos 1.980°C.

Ya conocemos el *termómetro bimetá-*

lico (figs. 1-16 y 1-17) formado por dos cintas de metales diferentes, unidas entre sí y arrolladas en forma de hélice. La dilatación diferencial del elemento bimetálico determina el movimiento de una aguja. Estos termómetros son cómodos y ro-

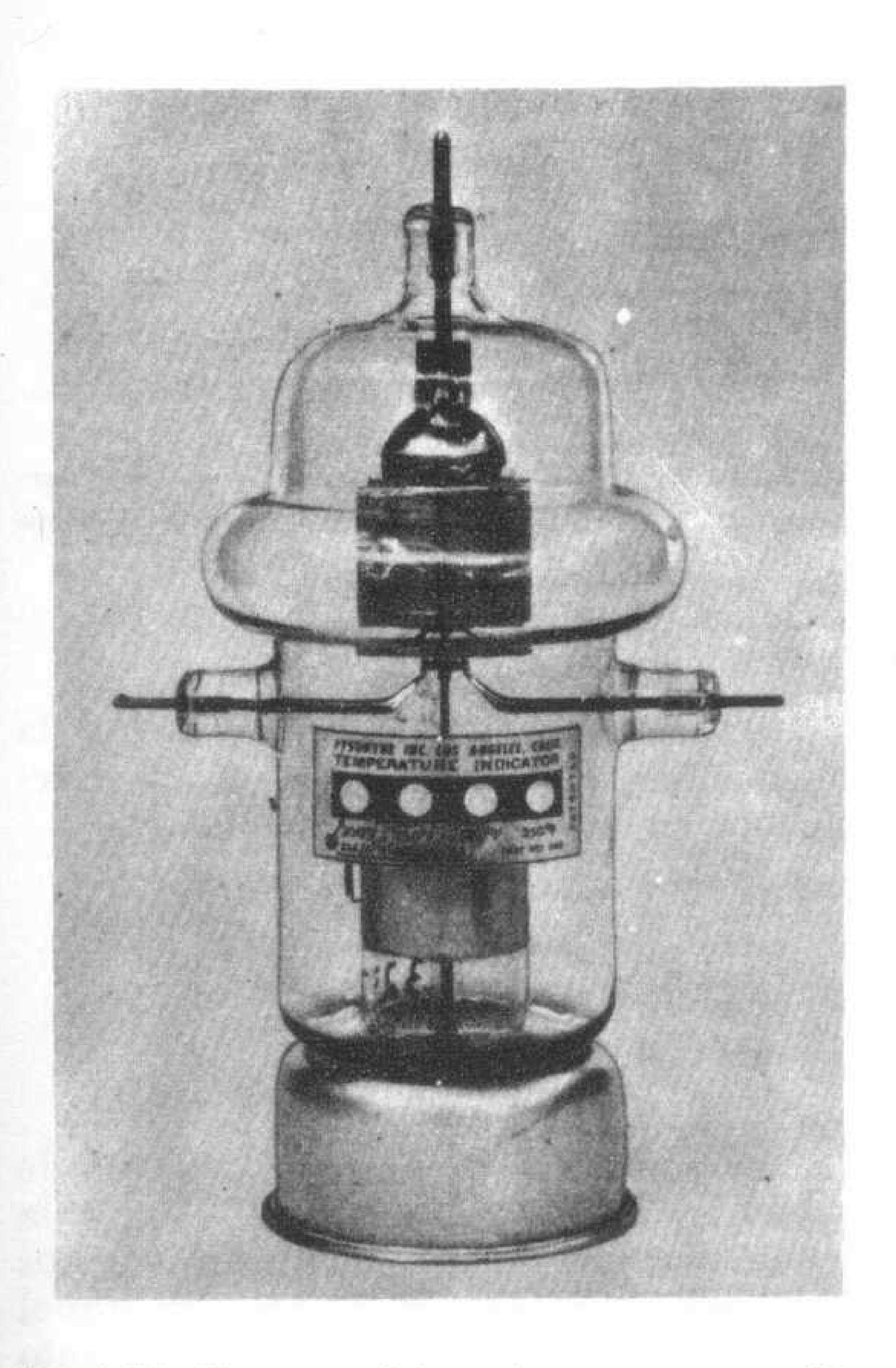


Fig. 1-15. Placa sensible a la temperatura, fijada a una válvula de radio. La variación del color, desde el amarillo claro hasta el negro intenso, es irreversible.

bustos, pero algo lentos y no muy exactos. Permiten mediciones entre −185°C y 420°C.

Recientemente se ha generalizado el uso de un nuevo sistema termométrico, que utiliza la presión desarrollada por un líquido (mercurio, alcohol, ciertos hidrocarburos) encerrado en un recipiente o gases (nitrógeno o helio) en las mismas condiciones y también vapores desprendidos por líquidos estables. El bulbo sensible a la temperatura se conecta mediante

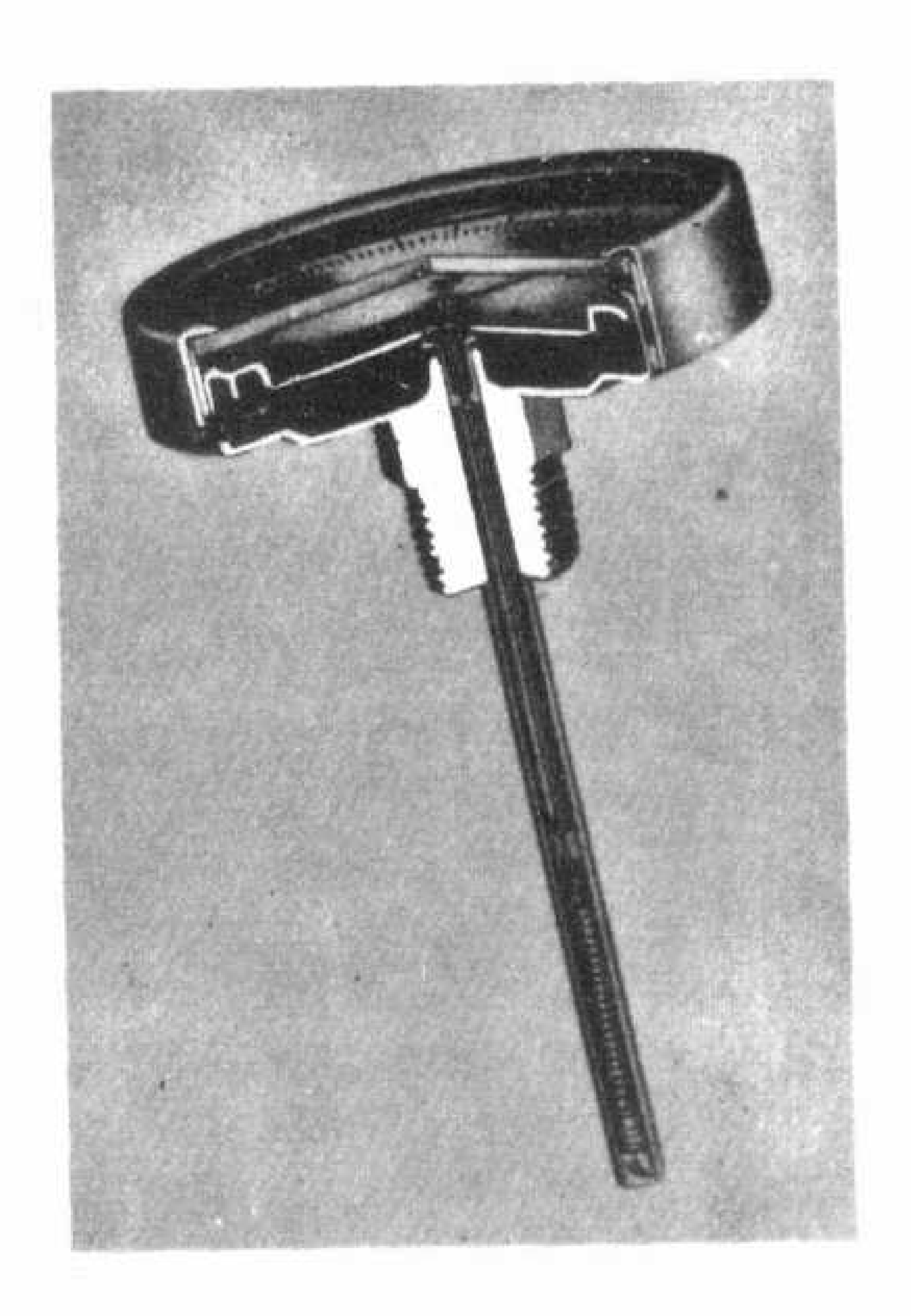


Fig. 1-16. Corte de un termómetro bimetálico.

un tubo capilar metálico a una cápsula manométrica Bourdon (fig. 1-18) que traduce las variaciones de presión en deflexiones de la aguja proporcionales a las mismas, y por lo tanto a las temperaturas

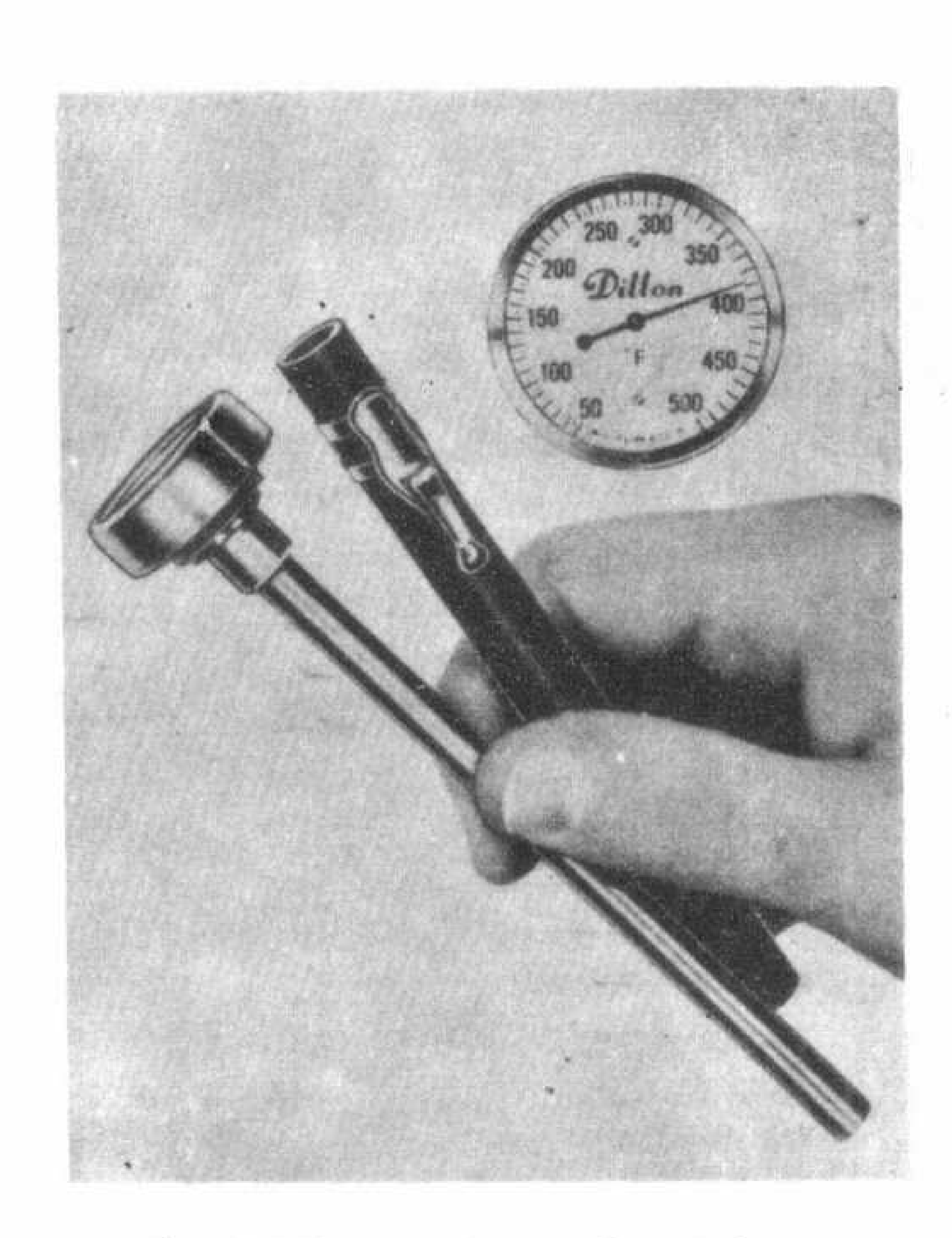


Fig. 1-17. Termómetro bimetálico.

que las produjeron. Cuando se emplea un líquido, estos termómetros sirven para temperaturas entre −157°C y 315°C; estando llenos de gas, alcanzan desde −240°C hasta 540°C. Los termómetros llenos de líquido tienen escala prácticamente lineal. En los instrumentos que trabajan mediante presión de vapor, en cambio, ésta dista mucho de serlo (fig. 1-19).

Ciertos metales (cobre, niquel, platino) y semiconductores (termistores) así como algunos óxidos metálicos varían notablemente su resistencia eléctrica cuando se los calienta. El cobre y el platino presentan una variación de resistencia proporcional a la temperatura; en los semiconductores, puede variar bruscamente en las mismas condiciones. Los límites de temperatura que pueden alcanzarse mediante un termómetro de resistencia de cobre, van desde −185°C hasta 120°C; siendo de niquel, desde −157°C hasta 300°C y cuando la resistencia es de platino, desde −240°C hasta 900°C. Los nuevos termómetros de resistencia de *germanio* son especialmente útiles en *criogenia* (temperaturas extremadamente bajas) alcanzando desde un mínimo de 1°K hasta un máximo de 100°K.

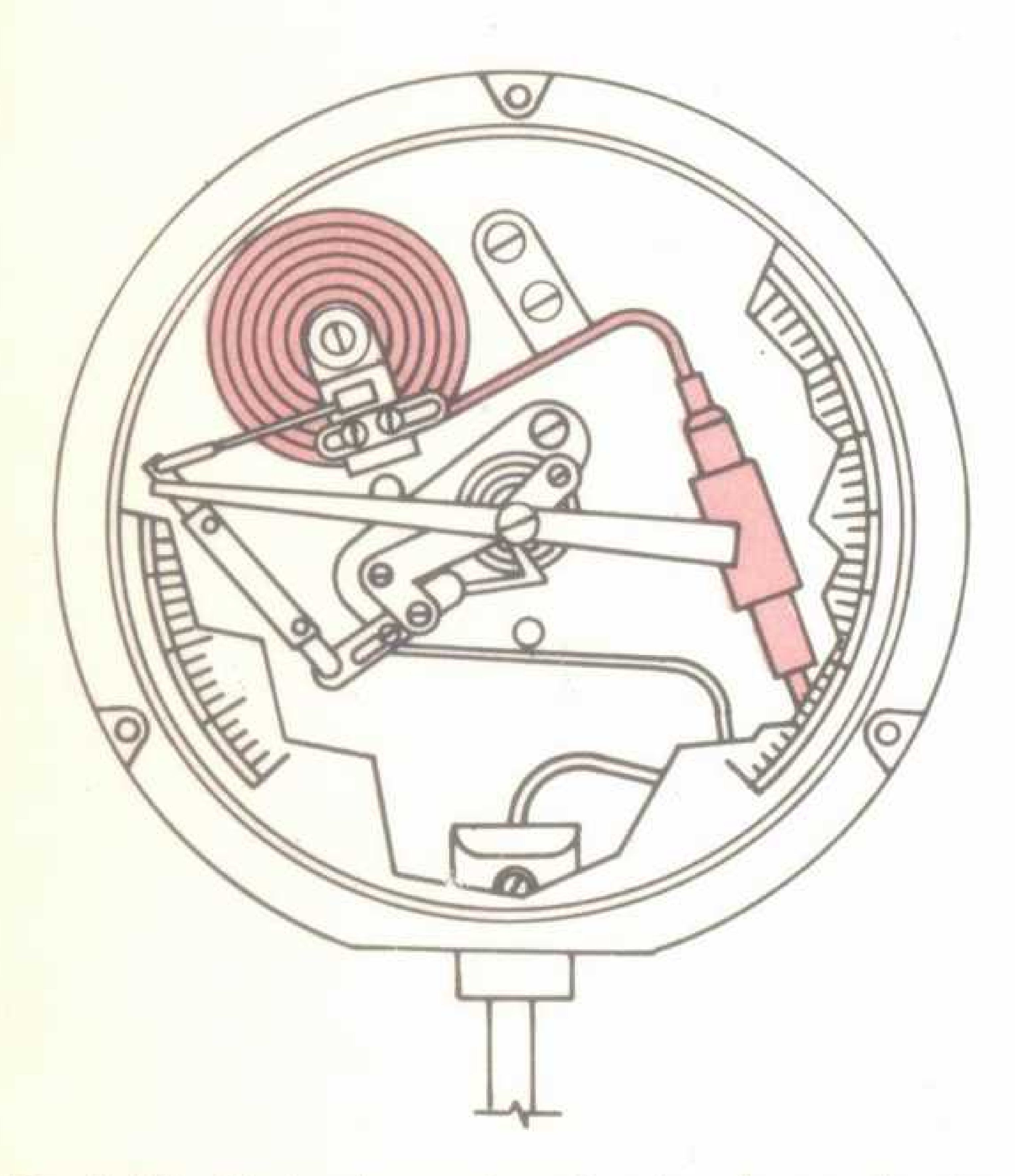


Fig. 1-18. Corte de un termómetro de cuadrante, con dispositivo sensible lleno de mercurio.

El elemento sensible de un termómetro de resistencia trabaja junto con el punte de Wheatstone (que se estudia en otro volumen de esta serie) que equilibra

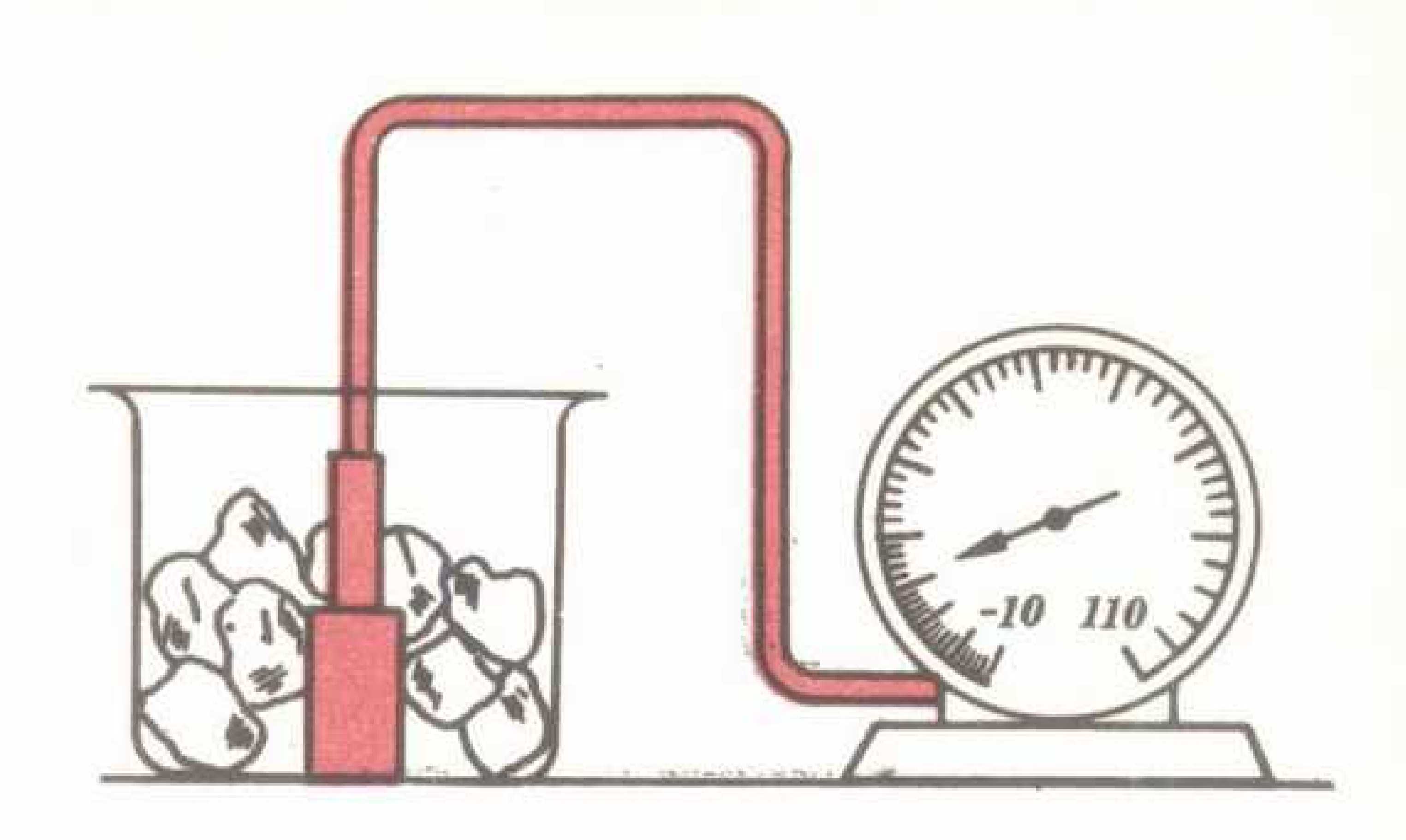


Fig. 1-19. Principio de funcionamiento del termómetro de cuadrante con dispositivo sensible lleno de vapor.

y mide la resistencia variable según la temperatura, obteniéndose rápida y exactamente su valor.

10 ESTUDIO MATEMATICO DE LA DILATACION

Sea un cable metálico de 500 m de longitud a 20°C y otro de 1.000 m a la misma temperatura. Calentando ambos cables a 60°C, se ha comprobado que el primero ha experimentado un incremento de 0,48 m en su longitud mientras que para el segundo ha sido de 0,96 m. Si bien en valor absoluto el incremento de longitud del segundo cable es doble del primero, el incremento por unidad de longitud es el mismo en ambos casos, puesto que $0{,}48/500 = 0{,}96/1.000$. Será esto suficiente para asegurar que los dos cables de que se trata son del mismo material.

Pero supongamos que el segundo cable ha experimentado el mismo incremento de longitud de 0,96 m para otra elevación de temperatura, por ejemplo, desde 20°C hasta 100°C (seguimos manteniendo el primer cable a 60°C). Evidentemente, es preciso tener en cuenta otro factor, o sea, la *elevación de temperatura*, antes de comparar las dilataciones experi-

mentadas. Recordando ésto, definiremos al *coeficiente de dilatación lineal* como el *incremento por unidad de longitud y por unidad de elevación de temperatura* que experimenta longitudinalmente el cuerpo de que se trate. Puede expresarse mediante la relación

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_o \times \Delta T} \qquad (1\text{-}5)$$

en la que alfa representa el coeficiente de dilatación lineal, Δl el incremento de longitud, l_o la longitud primitiva y T la elevación de temperatura.

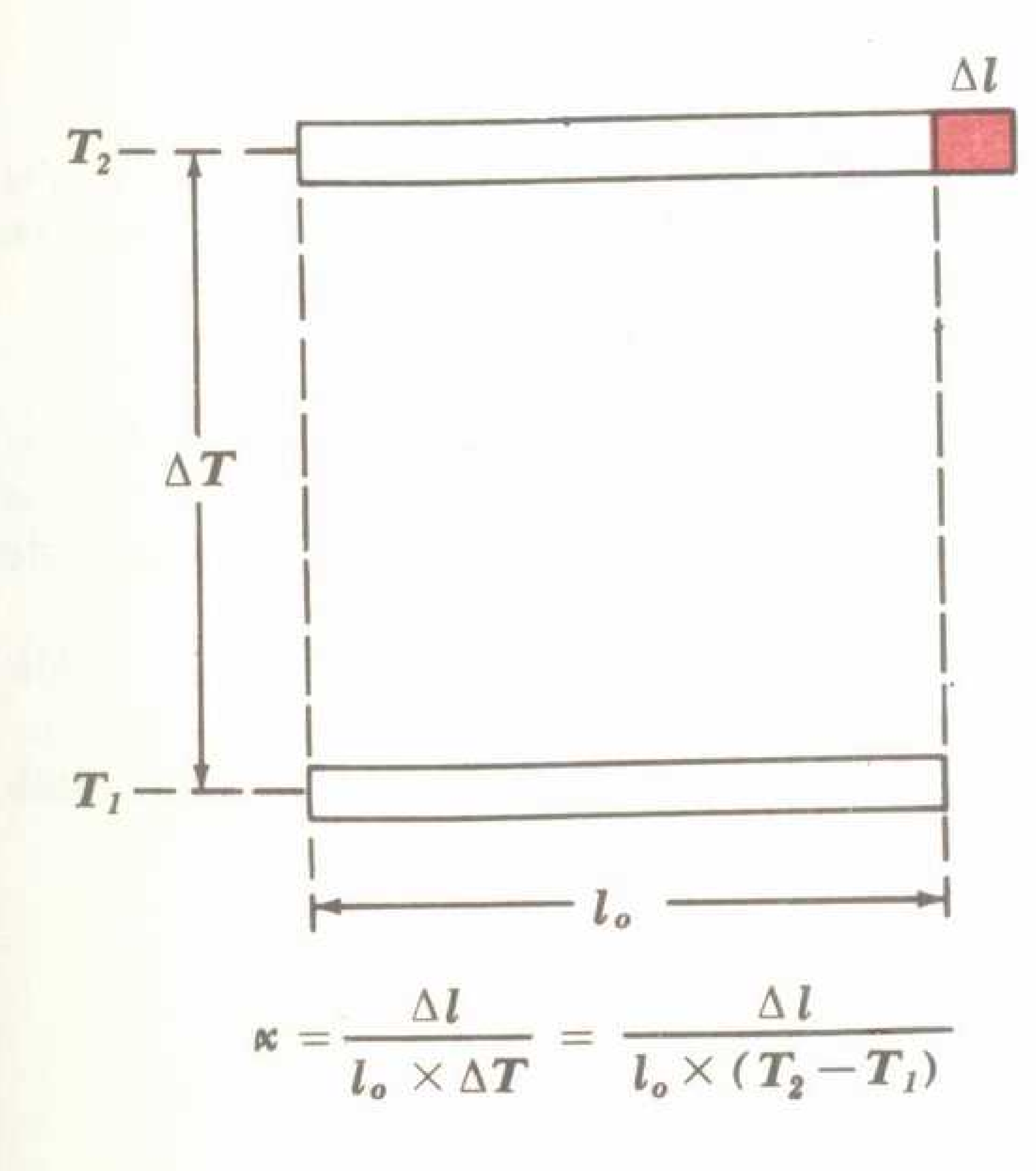


Fig. 1-20. Diagrama representativo de la dilatación lineal.

Aplicando esta relación al primer cable, obtenemos

$$\alpha = \frac{0{,}48}{500 \times 40} = 0{,}000024 \text{ por grado C}$$

y al segundo (más caliente)

$$\alpha = \frac{0{,}96}{1.000 \times 80} = 0{,}000012 \text{ por grado C}$$

Consultando la Tabla B del Apéndice, llegamos a la conclusión de que el primer cable podría ser de aluminio y el segundo de acero.

Obsérvese que un coeficiente de dilatación lineal α de 0,000024 por grado C, por ejemplo, significa una dilatación (o contracción) de 0,000024 cm por cada cm de longitud primitiva, por grado Celsius o también 0,000024 m por cada m y grado C, etc. Pero no sería lo mismo si se tratara de expresar el valor de α basándose en grados Fahrenheit. En este caso debería multiplicarse su valor por 5/9, equivalencia entre los intervalos termométricos de ambas escalas.

La fig. 1-20 representa gráficamente el significado del coeficiente de dilatación lineal.

• **Problema 3.** Un puente colgante de acero tiene una longitud de 1.070 m, a la temperatura de 30°C. Calcular su longitud cuando la temperatura haya descendido a 5°C. Supóngase que el coeficiente de dilatación lineal del acero es igual a 0,000012 por grado C.

Solución. Multiplicando la ecuación 1-5 por el denominador del segundo miembro de la misma, se tiene

$$\Delta l = \alpha \times l_o \times \Delta T$$

y sustituyendo valores, $\Delta l = 0{,}000012 \times 1.070 \times (30 - 5) = 0{,}321$ por lo tanto, la nueva longitud será

$$1.070 - 0{,}321 = 1.069{,}679 \text{ m.}$$

Es interesante observar que el coeficiente de *dilatación superficial* o sea el aumento relativo de superficie de una placa al calentarla es muy aproximadamente igual al doble del coeficiente de dilatación lineal del cuerpo de que está hecha. El coeficiente de *dilatación cúbica* al que nos referimos principalmente en el caso de líquidos y gases, es prácticamente igual al triple del coeficiente de dilatación lineal del cuerpo de que se trate. El lector

podrá, como ejercicio, demostrar que es cierto lo que acabamos de afirmar.

La dilatación de un gas sigue, dentro de ciertos límites, la ley enunciada primeramente por José Luis Gay-Lussac. Esta ley se conoce asimismo con el nombre de ley de Charles, quien también investigó la relación que nos ocupa.

La ley de Gay-Lussac dice que *la presión de un gas, mantenido a presión constante, es directamente proporcional a su temperatura absoluta.* Puede expresarse mediante la ecuación

$$V_1 : V_2 = T_1 : T_2 \qquad (1\text{-}6)$$

en la que V_1 representa el volumen primitivo del gas, V_2 el volumen final, T_1 la temperatura absoluta inicial y T_2 la temperatura absoluta final.

Unicamente los gases *perfectos* siguen la ley de Gay-Lussac cualquiera que sea el valor de la presión. Los gases *reales,* únicamente si aquélla no es muy superior a una atmósfera. La misma limitación sufre la ley de Boyle.

El coeficiente de dilatación cúbica es próximamente el mismo para todos los gases, siendo su valor igual a 1/273 o sea 0,0037 por grado Celsius. De esto se deduciría que enfriando un gas desde 0°C hasta −273°C (cero absoluto), la disminución de volumen del mismo sería igual a 273/273, o sea *todo* el volumen que tenía a 0°C. Los gases reales se licúan y al-

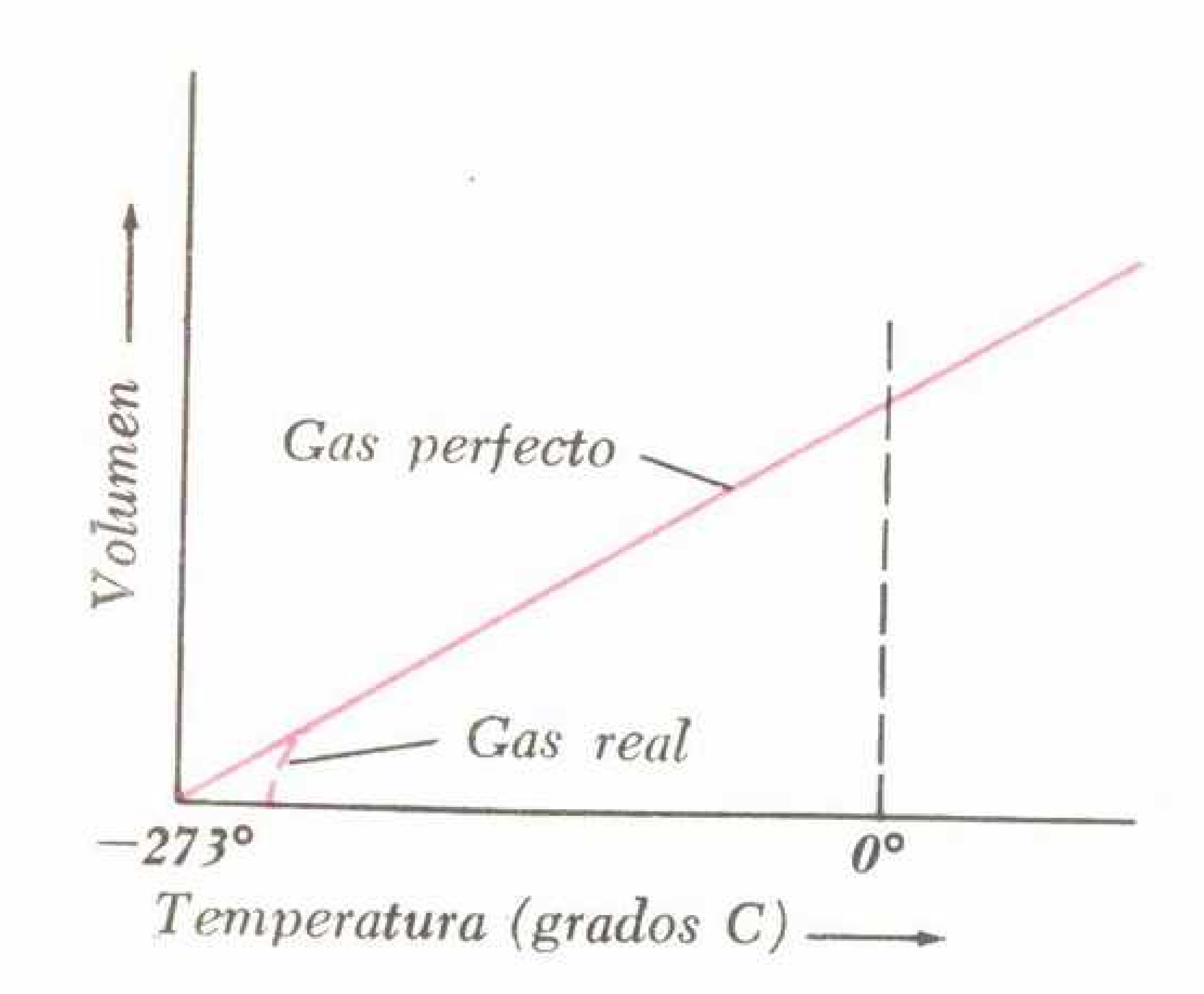


Fig. 1-21. Gráfico del volumen con respecto a la temperatura para un gas a presión constante.

gunos también se solidifican antes de alcanzar este punto, en cuyo caso ya no tiene sentido hablar de disminución de volumen.

En la fig. 1-21 puede verse un gráfico del volumen con respecto a la temperatura para un gas perfecto y un gas real.

REPASO

Preguntas

1 Dos cuerpos *A* y *B* se encuentran en equilibrio térmico. ¿Puede hablarse de intercambio de calor entre ellos? Justifíquese la respuesta.

2 Admitiendo la teoría del calórico, ¿cómo podría tratar de explicarse que un cuerpo calentado no varía de peso?

3 ¿Cuál es la diferencia técnica entre intervalo de 50°C y temperatura de 50°C?

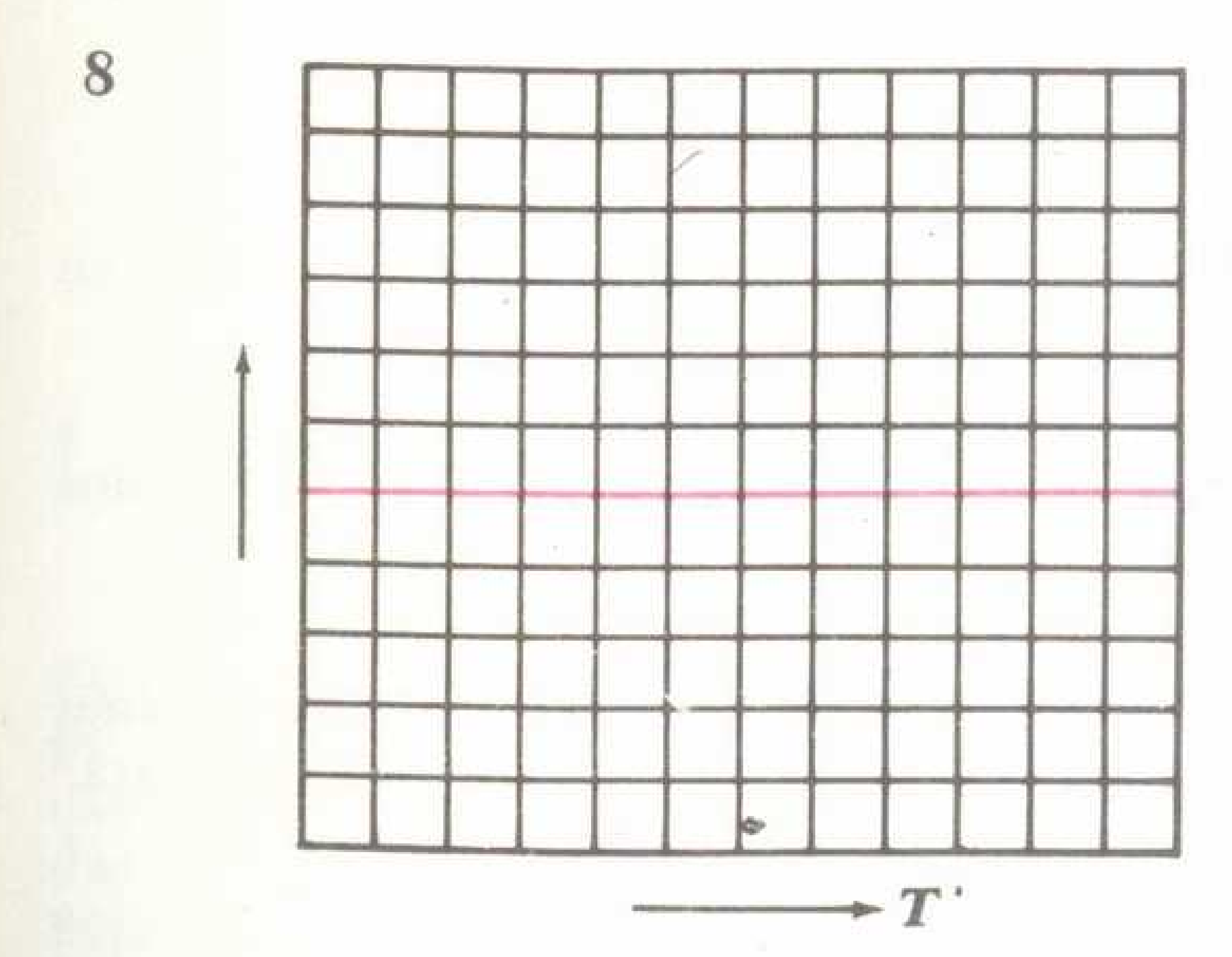
4 Se sumerge en agua una barra de hierro calentada al rojo. Mediante un diagrama de diferencias de nivel, hágase ver el sentido de la transferencia de calor que tendrá lugar. ¿Cuánto podrá durar dicha transferencia?

5 Compárense las dimensiones de un grado Kelvin con las de un grado Celsius; las de un grado Rankine con las de un grado Fahrenheit.

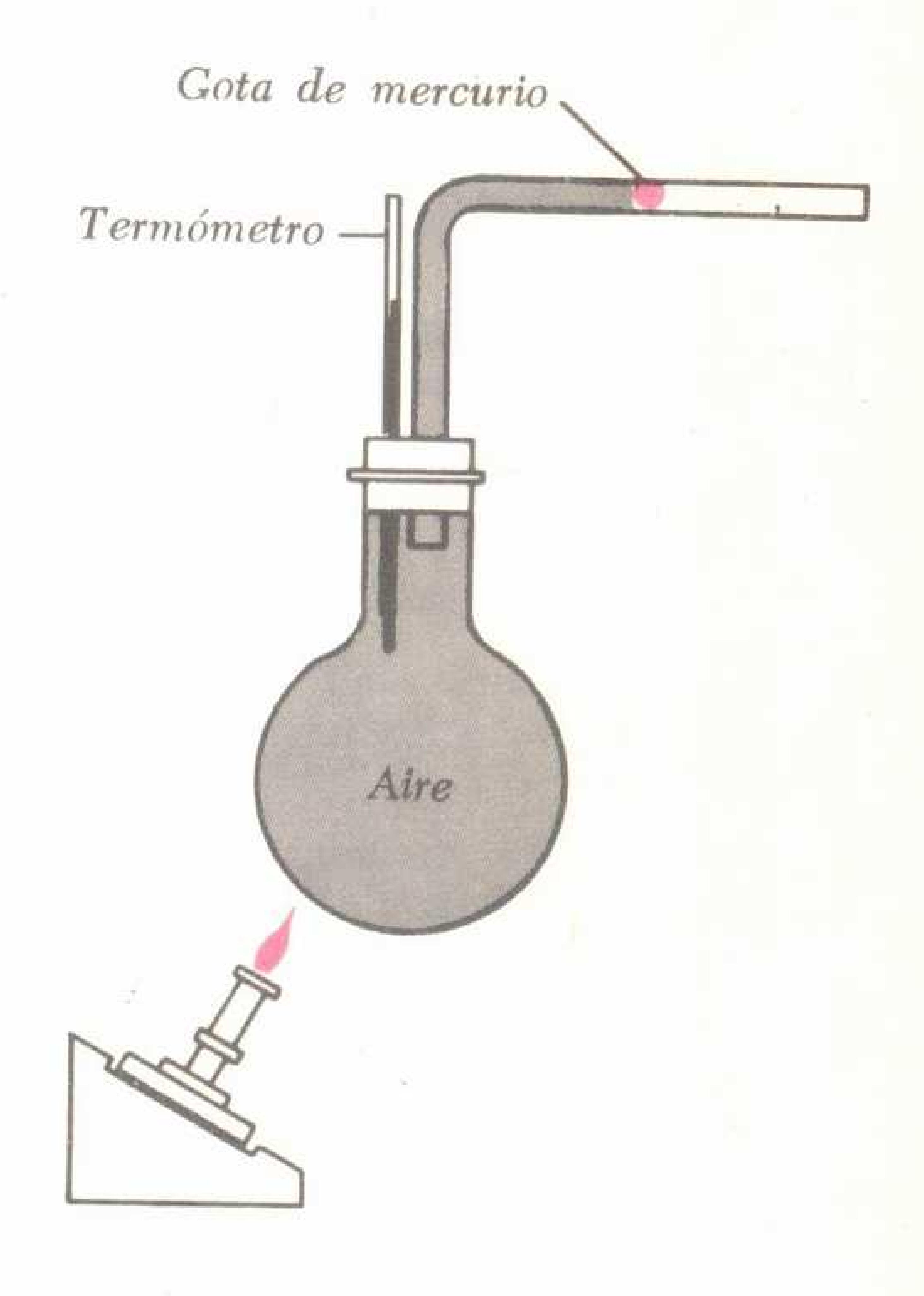
6 El coeficiente de dilatación lineal de un cristal de bismuto varía según el eje considerado. Explíquese por qué.

7 ¿Qué variación experimenta el diámetro interior de un anillo de hierro al aumentar su temperatura?

8



En el gráfico de la izquierda, la escala horizontal representa las temperaturas que alcanza una barra metálica de longitud l, sometida a temperaturas crecientes (T). ¿Cuál de las siguientes magnitudes: l_{final}, α o Δl podría utilizarse para la escala vertical?



9 En la disposición que se ve a la derecha, proyectada para comprobar la ley de Gay-Lussac, ¿qué papel desempeña la gota de mercurio?

Problemas

1 La variación de temperatura anual en determinada localidad, se extiende desde — 30°C hasta + 30°C. Exprésese en grados Fahrenheit.

2 La temperatura de una habitación sube desde x°F hasta y°F. Transfórmese esta elevación de temperatura en grados C.

3 Convertir 77°F en grados C; –60°C en grados F.

4 Expresar 45°C en grados K.

5 Convertir 140°C en grados R.

6 ¿A qué temperatura de la escala Celsius corresponde exactamente el doble en la escala Fahrenheit? ¿Y el triple?

7 ¿A qué temperatura son exactamente iguales las lecturas en las escalas Celsius y Fahrenheit?

8 Para determinada temperatura, las lecturas en las escalas Celsius y Fahrenheit son iguales en valor absoluto, pero de signo contrario. ¿Cuál es la temperatura?

9 Puede transformarse una temperatura en grados F en su equivalente en grados C, (*a*) sumándole 40, (*b*) multiplicando la suma por 5/9 y (*c*) restando 40 del producto. Demuéstrese la exactitud de este procedimiento.

10 ¿Cómo se debería modificar el procedimiento del problema anterior para convertir grados Celsius en Fahrenheit?

11 El coeficiente de dilatación lineal del acero es 0,000012 por grado C. ¿Cuánto valdrá su coeficiente de dilatación superficial? ¿Y de dilatación cúbica?

12 El diámetro de un pistón de aluminio es de 11 cm a 0°C. Hallar su diámetro a 160°C.

13 Un alambre de acero de 120 m de longitud a 60°C se enfría hasta 10°C. ¿Cuál es su nueva longitud?

14 Un litro de alcohol a 20°C aumenta su volumen hasta 1.033 ml calentado a 50°C. ¿Cuál es su coeficiente de dilatación cúbica?

15 Si se calienta a 90°C un gas cuyo volumen a 20°C es de 150 cm^3, manteniendo constante la presión, ¿cuál será su nuevo volumen?

16 Una cierta masa de argón ocupa un volumen de 20 cm^3 a 27°C. Calcular su volumen a la misma presión y 127°C.

MEDICION DEL CALOR

2

1 CANTIDAD DE CALOR

Supongamos que tenemos frente a nosotros dos vasos de gran tamaño, por ejemplo de 1 litro y ½ litro de capacidad, casi llenos ambos de agua y los colocamos en el mismo instante sobre dos llamas separadas de gas, de la misma intensidad (fig. 2-1 A). Supongamos también que se nos ha pedido calentar los dos vasos hasta que el agua de cada uno, inicialmente a la temperatura de 20°C, llegue a 60°C. ¿No es cierto, que tardará más el vaso que contiene mayor cantidad de agua? Y que si calentamos los dos vasos durante el mismo lapso de tiempo, por ejemplo 5 minutos (fig. 2-1 B) la temperatura del que contiene más agua habrá subido solamente unos grados mientras que el agua del menor habrá alcanzado los 60°C?

Evidentemente, la *masa* del cuerpo que se calienta tiene relación con la cantidad de energía calorífica que hace falta comunicarle para alcanzar la temperatura deseada. Habíamos definido anteriormente la temperatura como *nivel* del calor, pero daremos ahora más importancia al punto de vista que lo hace depender de la energía *molecular media*. Quedará claro así que la masa más grande de agua, conteniendo mayor número de moléculas, necesitará recibir mayor cantidad de calor (o mayor tiempo de calefacción) antes de alcanzar la misma energía por molécula que la alcanzada por la masa menor. Razonando de la misma manera, si suministramos la misma cantidad de energía calorífica a dos cantidades diferentes de agua, la distribución *por molécula* de la energía adquirida será menor y menor por

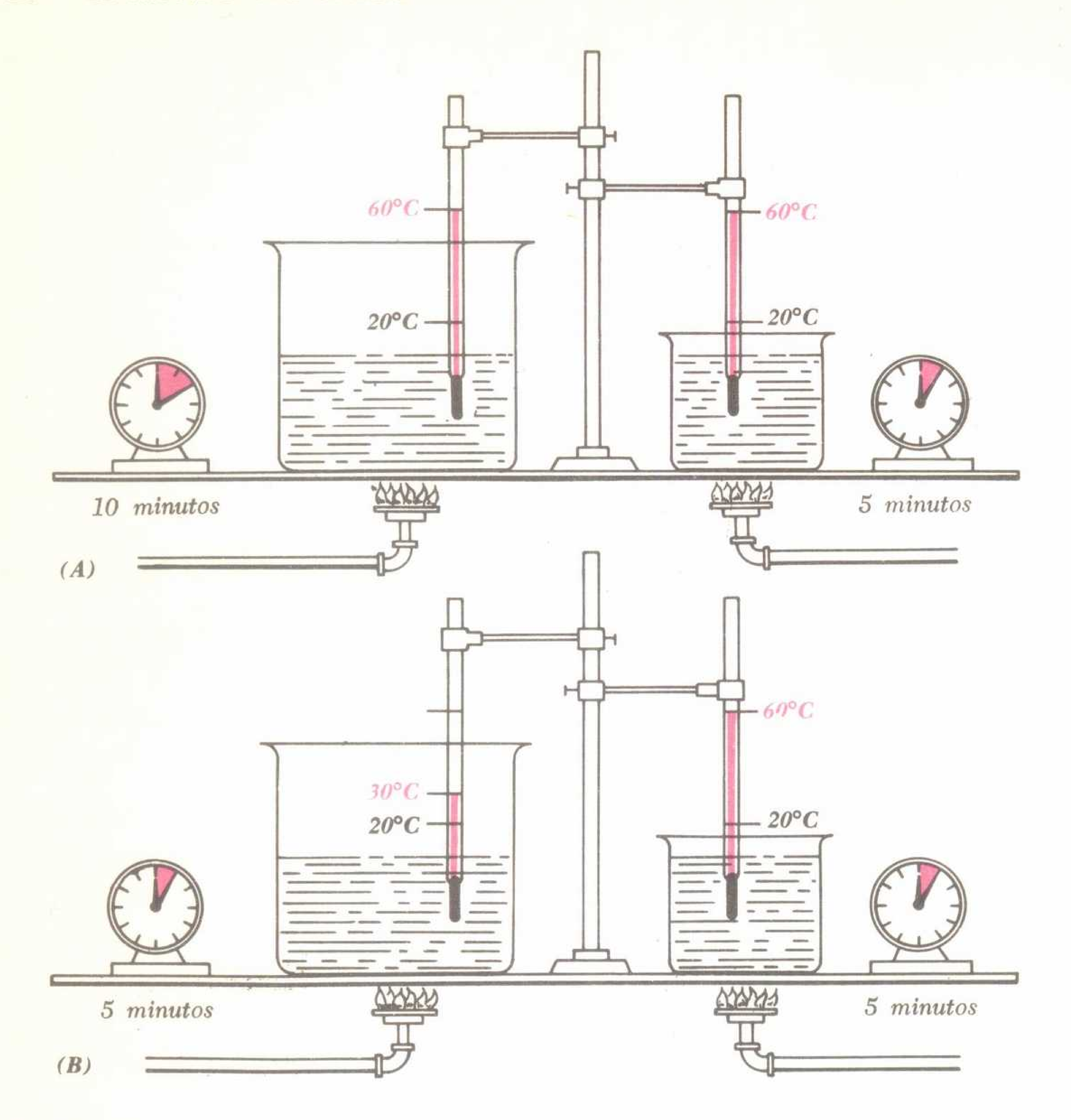


Fig. 2-1. La cantidad de calor transmitida al agua es función de su masa y del aumento de temperatura.

lo tanto la temperatura final en el caso de mayor masa de agua.

2 UNIDADES DE ENERGIA CALORIFICA

Para la medición del calor se emplean unidades especiales, que son la *caloría* (cal) y *kilocaloría* (Kcal) en los países que emplean el sistema métrico decimal y la *unidad térmica inglesa* (Btu, de British thermal unit) en los que emplean el sistema inglés. No obstante, como todas las formas de energía —mecánica, térmica, eléctrica, etc.— son equivalentes entre sí, se podrían emplear unidades tales como kilográmetros, ergios, julios o kilovatio-horas para medir la energía calorífica. Después de todo, no hay nada especialmente "térmico" en la caloría, como

tampoco tiene nada exclusivamente "mecánico" el kilográmetro. Por ahora, sin embargo, utilizaremos las unidades tradicionales.

Defínese la *caloría* (llamada también *caloría pequeña* o *caloría-gramo*) como la *cantidad de calor que debe comunicarse a un gramo de agua para elevar su temperatura en un grado C.* Técnicamente, el intervalo particular de temperatura a que se refiere la definición es entre 14,5°C y 15,5°C. Podemos suponer, sin embargo, que *cualquier* intervalo de un grado de la escala Celsius es satisfactorio.

Para elevar en un grado C 2 g de agua, se necesitan 2 cal. (La misma cantidad de calor haría falta para elevar en 2 grados C la temperatura de 1 g de agua). Para elevar en 6°C la temperatura de 5 g de agua, se necesitarán $5 \times 6 = 30$ cal. Para el agua *solamente,* podemos establecer que la cantidad de calor Q que debe suministrarse a la masa de agua m para elevar su temperatura en ΔT, se determina mediante la relación

$$Q \text{ (cal)} = m \text{ (g)} \times \Delta T \text{ (grados C)} \quad (2\text{-}1)$$

La misma relación sirve para calcular el calor *cedido* por una masa de agua cuando su temperatura disminuye desde agua m aumenta o disminuye su temperatura en un intervalo ΔT.

Se llama *kilocaloría* (o *caloría grande*) la cantidad de calor necesaria para elevar en un grado C la temperatura de 1 kg de agua. En física y química se emplea usualmente la caloría gramo, mientras que en biología y fisiología se prefiere la kilocaloría (1 kcal = 1.000 cal).

Unidad térmica inglesa (Btu) es la *cantidad de calor que debe comunicarse a una libra de agua para elevar en un grado Fahrenheit su temperatura.* (Obsérvese que en este caso se utiliza la libra como unidad de masa, en vez de peso.) Si bien el intervalo de temperatura a que se refiere la definición anterior está comprendido entre 63°F y 64°F, no se comete error apreciable al considerar cualquier intervalo de un grado dentro de la escala F.

Es evidente que la cantidad total de unidades térmicas inglesas que deben comunicarse (o quitarse) es igual a la masa de agua expresada en libras, multiplicada por la variación de temperatura en grados Fahrenheit, o sea

$$Q \text{ (Btu)} = m \text{ (libras)} \times \Delta T \text{ (grados F)} \quad (2\text{-}2)$$

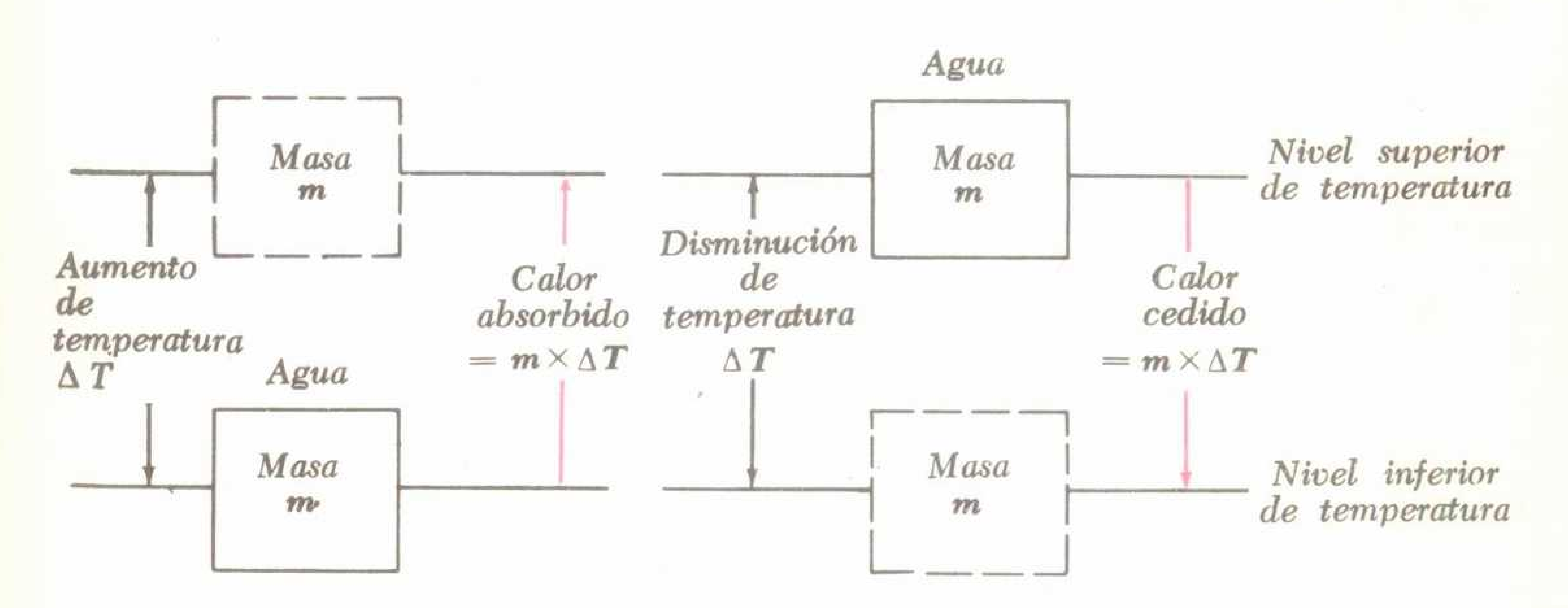


Fig. 2-2. Diagrama para el cálculo del calor (agua solamente).

un cierto nivel a otro más bajo. La fig. 2-2 representa en forma de diagrama el procedimiento para calcular el calor absorbido o cedido cuando una masa de

Como que 1 libra = 454 g y un grado F = 5/9 grado C, se deduce que 1 Btu, o cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de 454 g de agua en 5/9

grado C, será igual a 454 × 5/9 o sea 252 cal (aproximadamente, 1 Btu = 1/4 kcal).

En la fig. 2-3 se resume el significado de las tres unidades tradicionales de cantidad de calor que acabamos de estudiar.

a 20°C. No puede ser el promedio de las dos temperaturas, puesto que las cantidades de agua son diferentes.

Si el intercambio de calor se realiza sin pérdida ninguna hacia los cuerpos que rodean a las masas de agua, podemos igualar las dos cantidades de calor que intervienen en el proceso, tal como sigue:

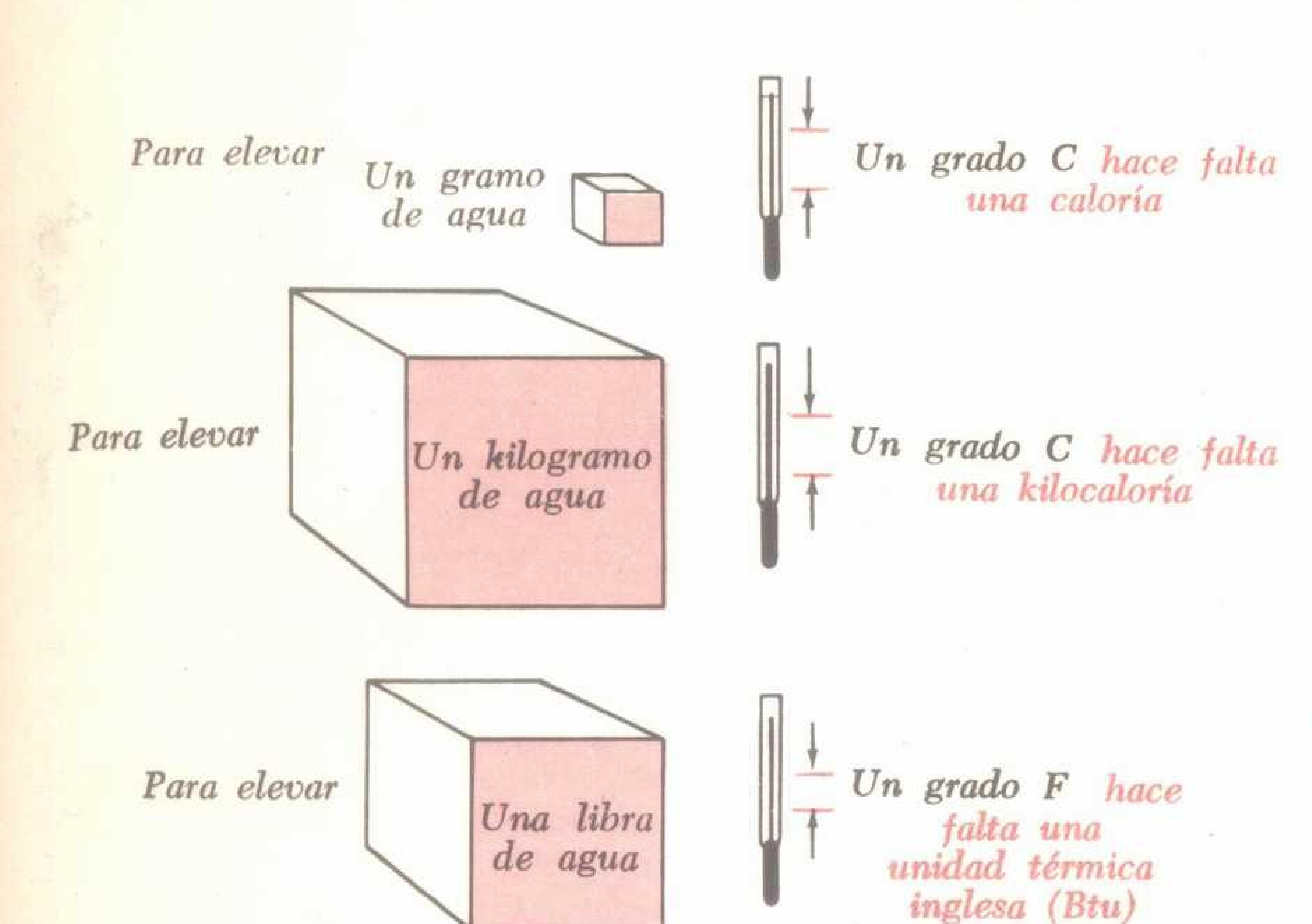


Fig. 2-3. Significado de las tres unidades en que se mide el calor.

3 INTERCAMBIO DE CALOR: MEZCLA DE AGUA CALIENTE Y FRIA

El principio fundamental que debe tenerse en cuenta en todo proceso que se refiere al intercambio de calor es que *la cantidad de calor cedida por el cuerpo más caliente es igual a la absorbida por el más frío*. Lo que equivale a decir que *debe conservarse la energía calorífica* y que ninguna parte de ella ni siquiera la irradiada hacia el ambiente o la absorbida por la vasija en que se hace la mezcla (calorímetro) puede perderse, rigurosamente hablando. Prescindiremos por ahora de estos factores y limitaremos nuestro estudio exclusivamente a la mezcla de agua caliente y fría.

Supongamos que se mezclan 200 g de agua a 70°C con 150 g de agua a 20°C. Veamos cómo se puede calcular la temperatura T de la mezcla. Es evidente que T debe ser inferior a 70°C, pero superior

Q (calor cedido por el agua caliente) = Q' (calor absorbido por el agua fría)

Estableciendo que cada valor de Q es igual al producto de la masa de agua por su correspondiente variación de temperatura, obtendremos

$$200\ (70 - T) = 150\ (T - 20)$$

de la que se deduce

$$T = 48{,}5°\text{C}.$$

En la fig. 2-4 se ilustra gráficamente la solución.

Los problemas de mezcla en que intervienen unidades térmicas inglesas, se resuelven de la misma manera. Supongamos, por ejemplo, que se mezclan 80 libras de agua a 160°F con 50 de agua a 120°F. Para hallar la temperatura T de la mezcla, expresemos primeramente en unidades Btu el calor perdido por el agua caliente. Este calor es Q, o sea 80 (160 –

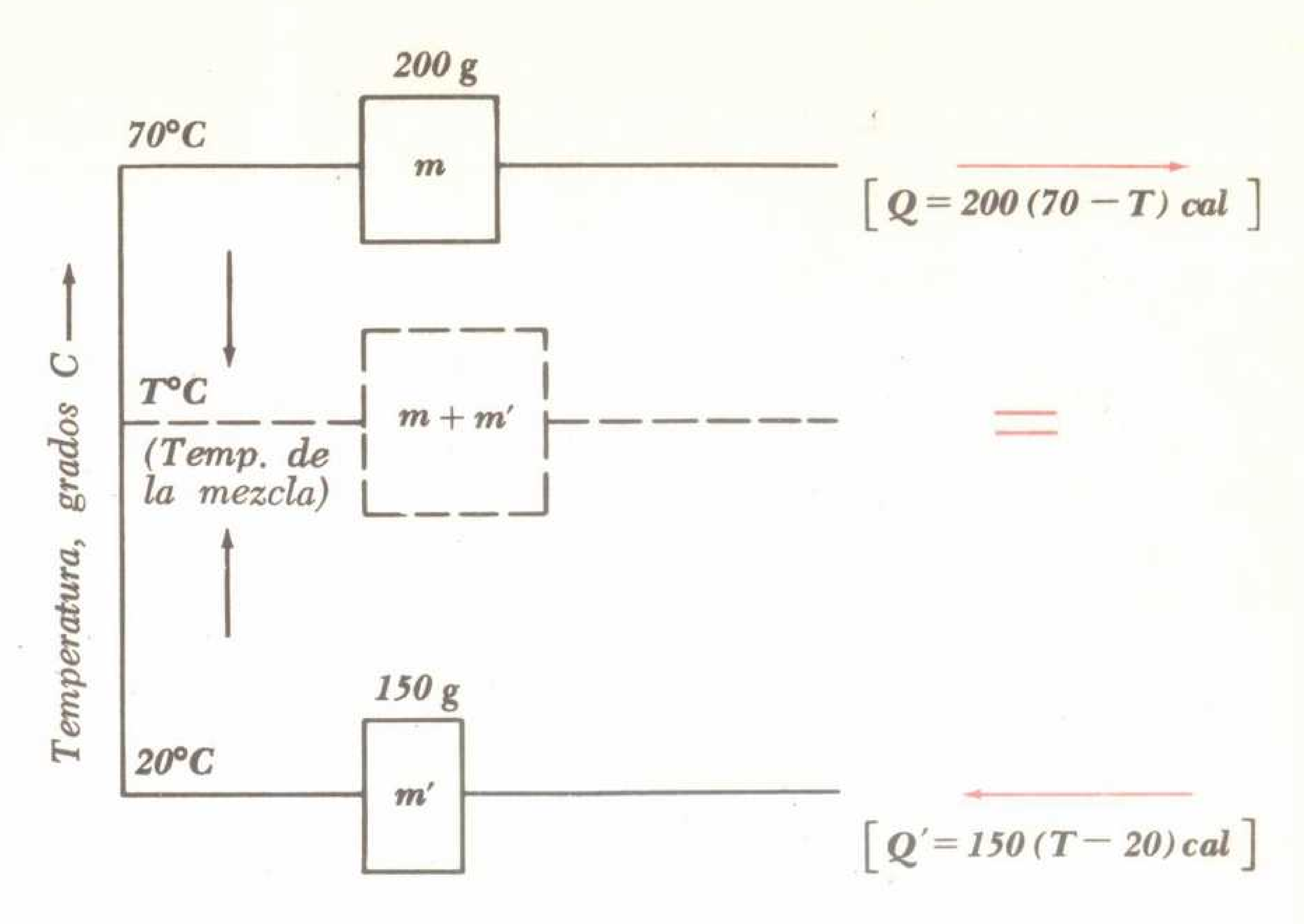


Fig. 2-4. Diagrama de un problema de intercambio simple de calor (sistema cgs, para el caso de agua solamente).

T) Btu. Escribamos luego el calor ganado por el agua fría, que es $Q' = 50(T - 120)$ Btu. Igualando los valores de Q y Q', se obtiene

$$80\ (160 - T) = 50\ (T - 120)$$

de donde

$$T = 144°\text{F}.$$

En la fig. 2-5 puede verse el diagrama correspondiente a esta solución.

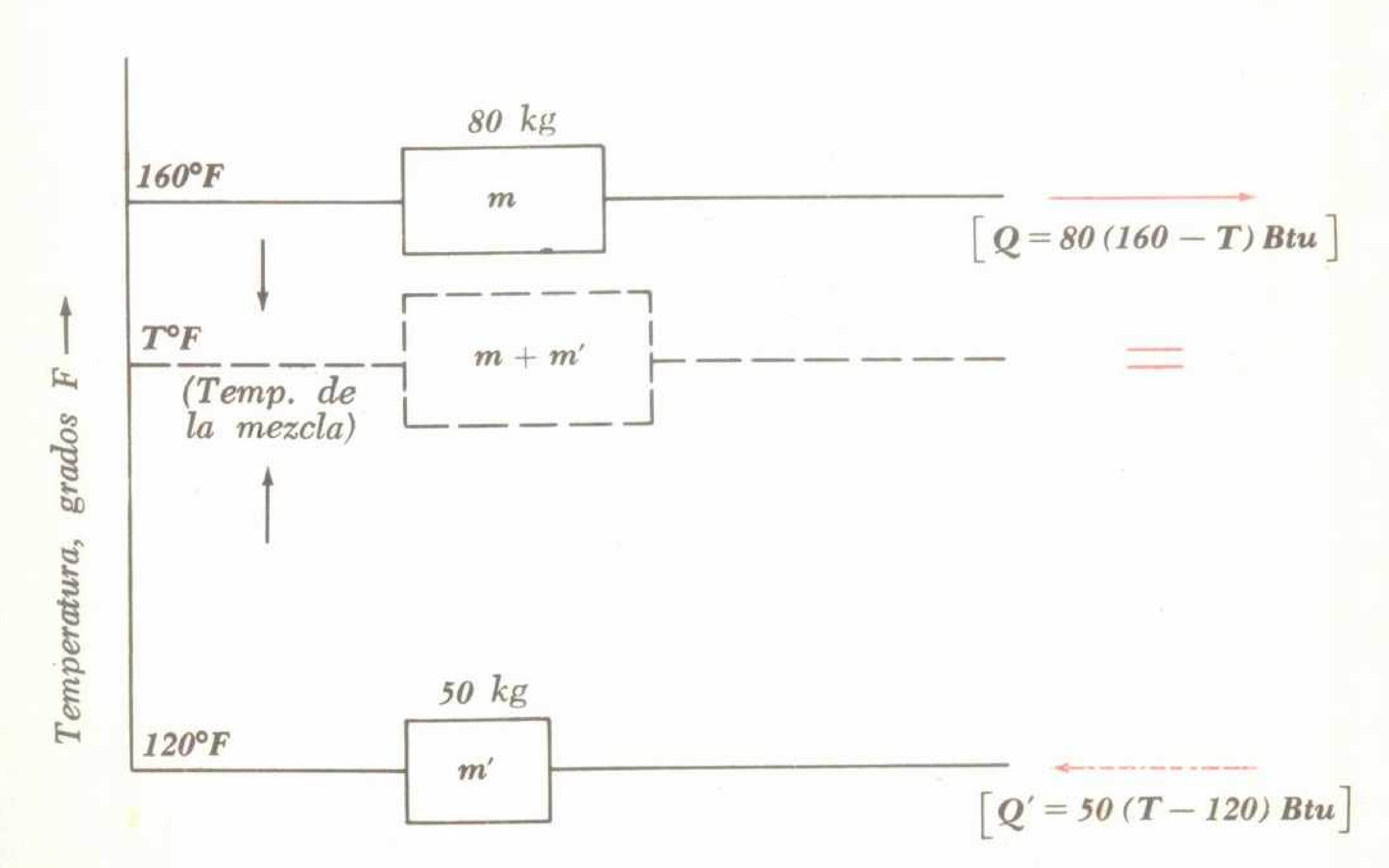


Fig. 2-5. Diagrama de otro intercambio de calor (sistema inglés, para el caso de agua solamente).

4 CALOR ESPECIFICO Y CAPACIDAD CALORIFICA

Apliquemos la llama de un Bunsen a un caldero con agua y calentemos al mismo tiempo un bloque de hierro sobre una llama de igual intensidad. Supongamos que la masa del agua sea idéntica a la del hierro y que ambas se encuentren inicialmente a la temperatura ambiente (20°C). En cuanto el agua llegue a la temperatura de 60°C, por ejemplo, apaguemos los dos mecheros, que podremos suponer han cedido igual cantidad de calor a los dos cuerpos. Rociando la superficie del hierro con unas gotas de agua, el chirrido que producen demuestra que el metal habrá llegado (y probablemente sobrepasado) los 100°C, punto de ebullición del agua, mientras la cantidad de agua de igual masa ha llegado solamente a 60°C. Es evidente que a pesar de haber suministrado igual cantidad de calor (Q) a masas iguales de agua y hierro, estos cuerpos han adquirido incrementos de temperatura (ΔT) diferentes.

La explicación reside en el hecho de que cuerpos diferentes tienen también diferente *calor específico* o *cantidad de calor necesaria para elevar la unidad de masa en un grado de la escala de temperatura que se adopte*. Por definición, el calor específico del agua es la unidad, o sea una caloría por grado C, puesto que se necesita comunicar una caloría a un gramo de agua para elevar en un grado C su temperatura. El calor específico del agua es también unidad si se utiliza el sistema inglés, puesto que se necesita una unidad térmica inglesa para elevar en un grado F una libra de agua. Evidentemente, suministrando la misma cantidad de calor a masas iguales de agua y de hierro, teniendo éste una capacidad calorífica aproximadamente igual a la novena parte de la que tiene el agua, elevará su temperatura a un nivel proporcionalmente mayor.

Representamos el calor específico mediante el símbolo c, factor adicional que debemos introducir en la relación mencionada anteriormente, $Q = m \times \Delta T$. Cuando sea preciso calcular la cantidad de calor necesaria para elevar en un intervalo determinado de temperatura la masa de un cuerpo *diferente del agua*, utilizaremos la siguiente relación, de carácter más general:

$$Q \text{ (cal)} = m \text{ (g)} \times c \text{ (calor específico)} \times \Delta T \text{ (en grados C)} \qquad (2\text{-}3)$$

y en el sistema inglés ,

$$Q \text{ (Btu)} = m \text{ (libras)} \times c \text{ (calor específico)} \times \Delta T \text{ (en grados F)} \qquad (2\text{-}4)$$

En las ecuaciones precedentes, el producto $m \times c$ representa la *capacidad calorífica* del cuerpo. Puede definirse como la cantidad de calor que debe comunicarse a un cuerpo *en su totalidad* (no a su unidad de masa) para elevar su temperatura en un grado. Tratándose de *calorímetros* o recipientes para estudiar el intercambio de calor, se acostumbra emplear la expresión *equivalente en agua* en lugar de referirse a la capacidad calorífica del recipiente. Un calorímetro de acero ($c = 0{,}11$ cal/g/C°) de 100 g, por ejemplo, equivale térmicamente a $100 \times 0{,}11$ o sea 11 g de agua.

En el experimento ilustrado en la fig. 2-6 se tiene otra demostración de que diferentes cuerpos poseen también diferente calor específico. Cuatro esferas metálicas de igual masa pero de metales diferentes (aluminio, cobre, hierro y plomo) adquieren la temperatura de 100°C al estar sumergidas durante unos minutos en agua hirviendo en recipiente abierto (A). Retirándolas del agua, se colocan sobre un bloque de cera o parafina (B). Las esferas se hunden a diferentes profundidades, demostrando que han cedido cantidades diferentes de calor a la cera o parafina. La de aluminio funde mayor cantidad, correspondiendo la menor al plomo.

Las poco comunes propiedades del agua (su calor específico anormalmente elevado, por ejemplo) se explican por la unión o grado de afinidad del hidrógeno, fuerza que une entre sí las moléculas de agua. Como que la energía necesaria para elevar la temperatura del agua a un nivel superior debe ser suficiente no sólo para

producir la agitación térmica necesaria sino que debe incluir también la energía necesaria para debilitar la unión molecular interna, el calor específico del agua es notablemente elevado (el del amoniaco líquido aun lo es más). Así se explica porqué las grandes masas de agua pueden almacenar considerable cantidad de energía interna, disponible para ceder a los cuerpos más fríos que las rodean. Además, la temperatura o nivel térmico de estos depósitos caloríficos varía poco durante el intercambio térmico. Como consecuencia natural, los océanos, mares, lagos y ríos ejercen efecto moderador y estabilizador sobre las tierras vecinas que, en ausencia de agua, estarían expuestas a grandes variaciones de temperatura según las estaciones del año. También el alto valor del calor específico del agua hace que se utilice en los sistemas de refrigeración de motores de explosión, sistemas de calefacción por agua e instalaciones de aire acondicionado.

En la Tabla B del Apéndice se encontrará el calor específico de varios cuerpos, expresado en cal/g/°C. Son valores medios, puesto que los exactos dependen del intervalo de temperatura para la cual se determina aquella constante.

5 MAS SOBRE INTERCAMBIO DE CALOR: ESTUDIO GENERALIZADO

Podemos ampliar ahora el "método de las mezclas" previamente estudiado para abarcar aquellos casos en que el intercambio de calor se verifica entre *cualquier clase* de cuerpos en contacto térmico. Estudiaremos también el papel que desempeña el calorímetro.

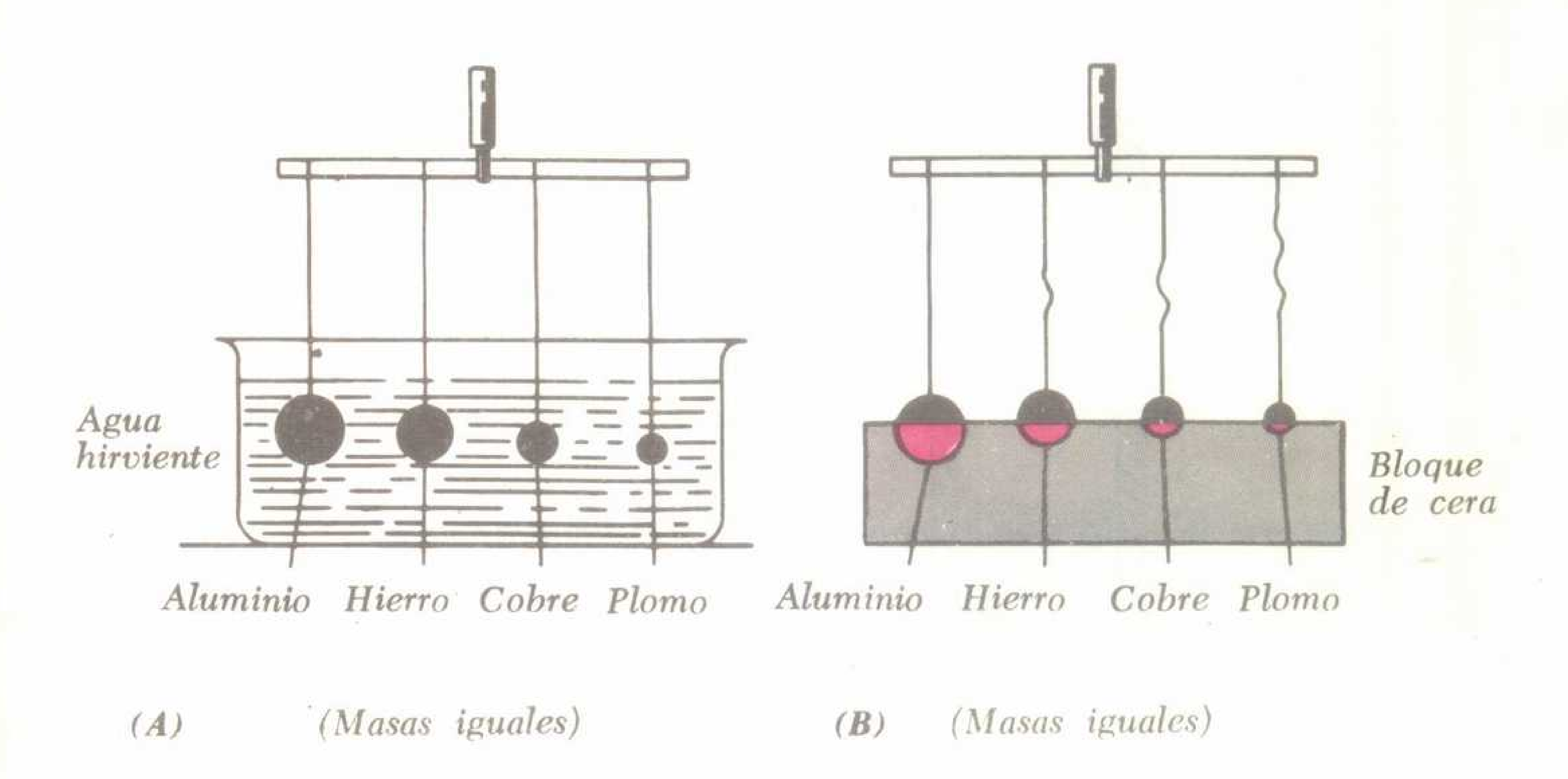


Fig. 2-6. Cuerpos diferentes tienen también diferente calor específico. La profundidad de penetración en la cera da una idea aproximada del calor específico de los metales.

Supongamos un cilindro de latón ($c = 0{,}09$) a la temperatura inicial de 200°C, sumergido en 150 g de alcohol ($c = 0{,}581$) a 25°C, contenido en un calorímetro de aluminio de 120 g también a la temperatura de 25°C (para el aluminio, $c = 0{,}212$). Se desea hallar la temperatura T del conjunto.

El calor cedido por el cilindro de latón es igual a

$$[300 \times 0{,}09 \times (200 - T)] \text{ cal}$$

El calor absorbido por el alcohol y el calorímetro es igual a

$$[150 \times 0{,}581 \times (T - 25) + 120 \times 0{,}212 \times (T - 25)] \text{ cal}$$

temperatura bastante alta. Pensando un poco, vemos que la respuesta es razonable, puesto que la *cantidad* de calor cedida por el latón es en realidad pequeña debido a la poca capacidad calorífica de este cuerpo. Este ejemplo destaca una

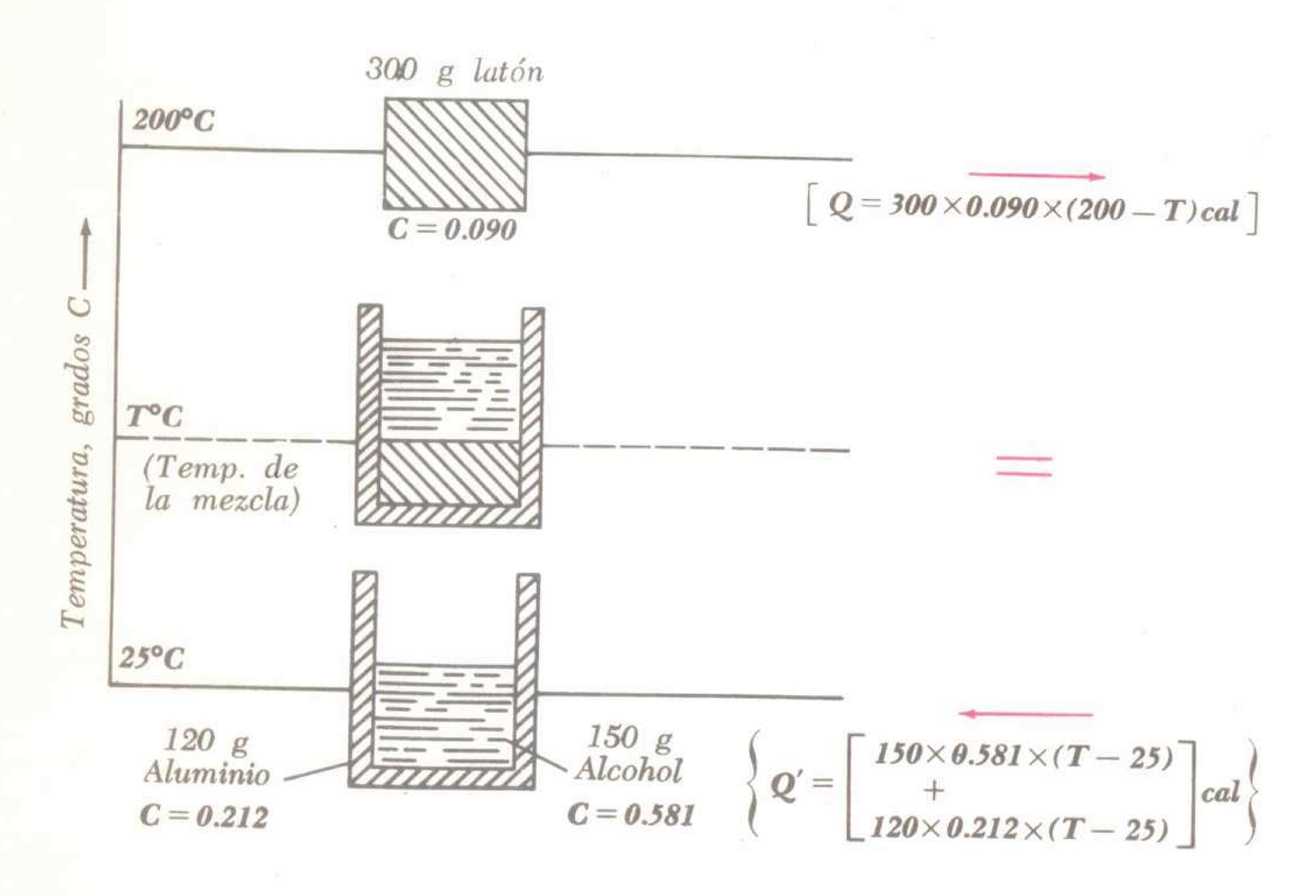


Fig. 2-7. Diagrama de un intercambio de calor entre cuerpos de diferente calor específico, mediante el calorímetro.

Igualando el calor cedido y el absorbido, resulta, después de una primera simplificación,

$$27\,(200 - T) = 87{,}2\,(T - 25) + 25{,}4\,(T - 25)$$

de donde

$$T = 58{,}9\text{°C}$$

La fig. 2-7 representa en forma de diagrama, el intercambio de calor estudiado.

Podría extrañarnos que se obtenga solamente una temperatura de 58,9°C teniendo en cuenta que hemos añadido al alcohol una masa considerable de metal a

vez más la diferencia entre *temperatura* y *calor*.

6 POTENCIA CALORIFICA DE ALIMENTOS Y COMBUSTIBLES

Los combustibles y los alimentos son fuentes de energía. Una pequeña parte de la energía total recibida del sol, que contribuye a la formación de materia orgánica, se transforma luego, debido a cambios geológicos, en combustibles fósiles. Las disponibilidades de éstos se agotan rápidamente, por lo que adquiere cada vez mayor interés la utilización de otras

formas de energía. Las reservas actuales de combustibles fósiles y gas natural, se consideran equivalentes a 7×10^{18} Kcal. Por otra parte, la energía recibida del sol es inagotable, la energía que puede obtenerse por fisión del uranio y torio tiene un potencial considerado igual a $1{,}5 \times 10^{20}$ Kcal y la que podría obtenerse del deuterio existente en el agua del mar, sería aproximadamente igual a $2{,}5 \times 10^{27}$ Kcal. Bastaría para ello que el hombre pudiera liberarla mediante el proceso de fusión controlada.

En la Tabla 2-1 se da la potencia calorífica de algunos combustibles y alimentos.

Tabla 2-1: POTENCIA CALORIFICA DE COMBUSTIBLES Y ALIMENTOS, EN KILOCALORIAS POR KG

Alcohol etílico	7,13
Benceno	10,0
Grasa de manteca	9,2
Antracita	3,4
Hulla grasa	3,53
Petróleo (fuel-oil)	4,54
Glucosa	3,75
Almidón	4,22
Sacarosa	4,0

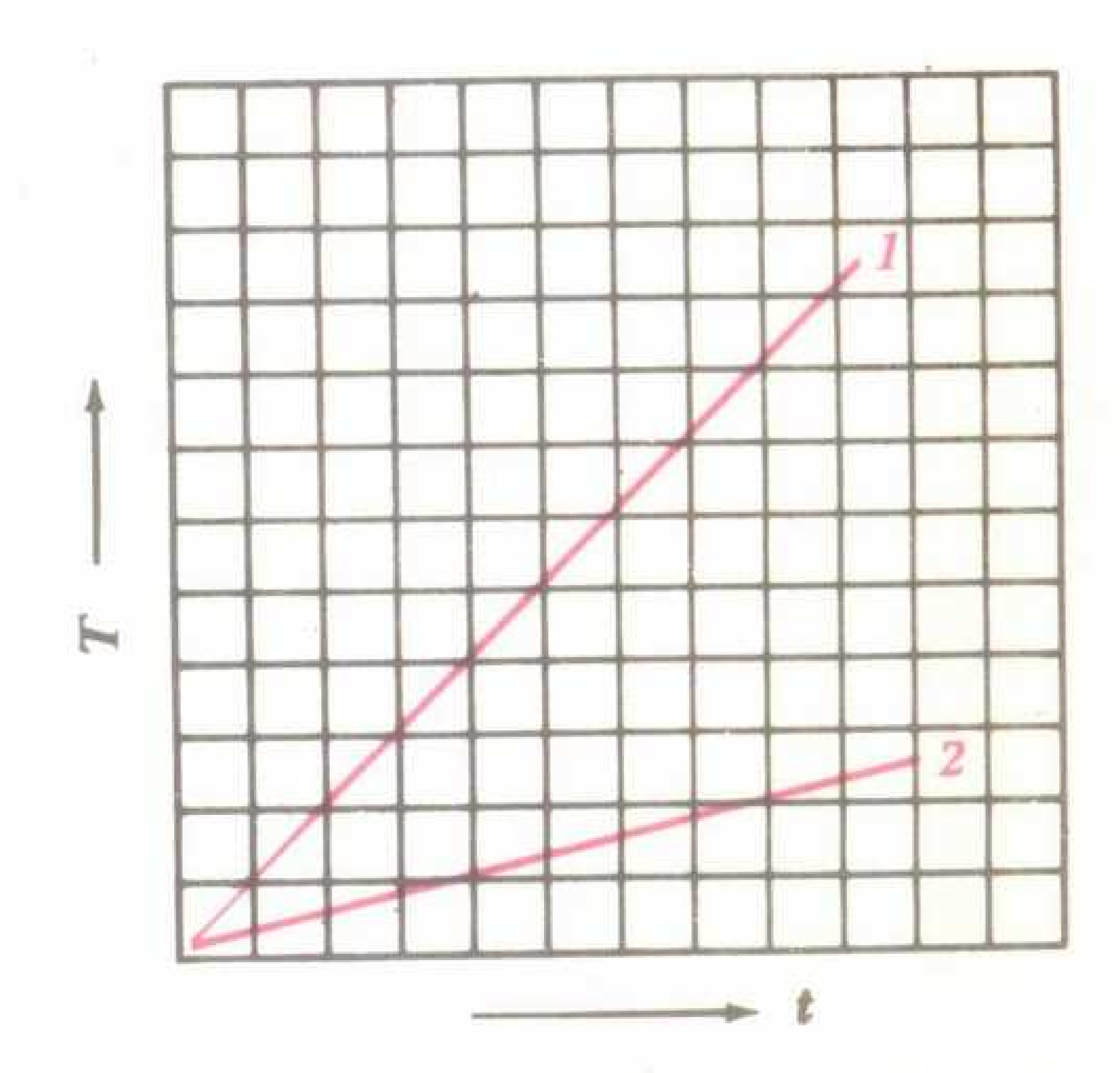
REPASO

Preguntas

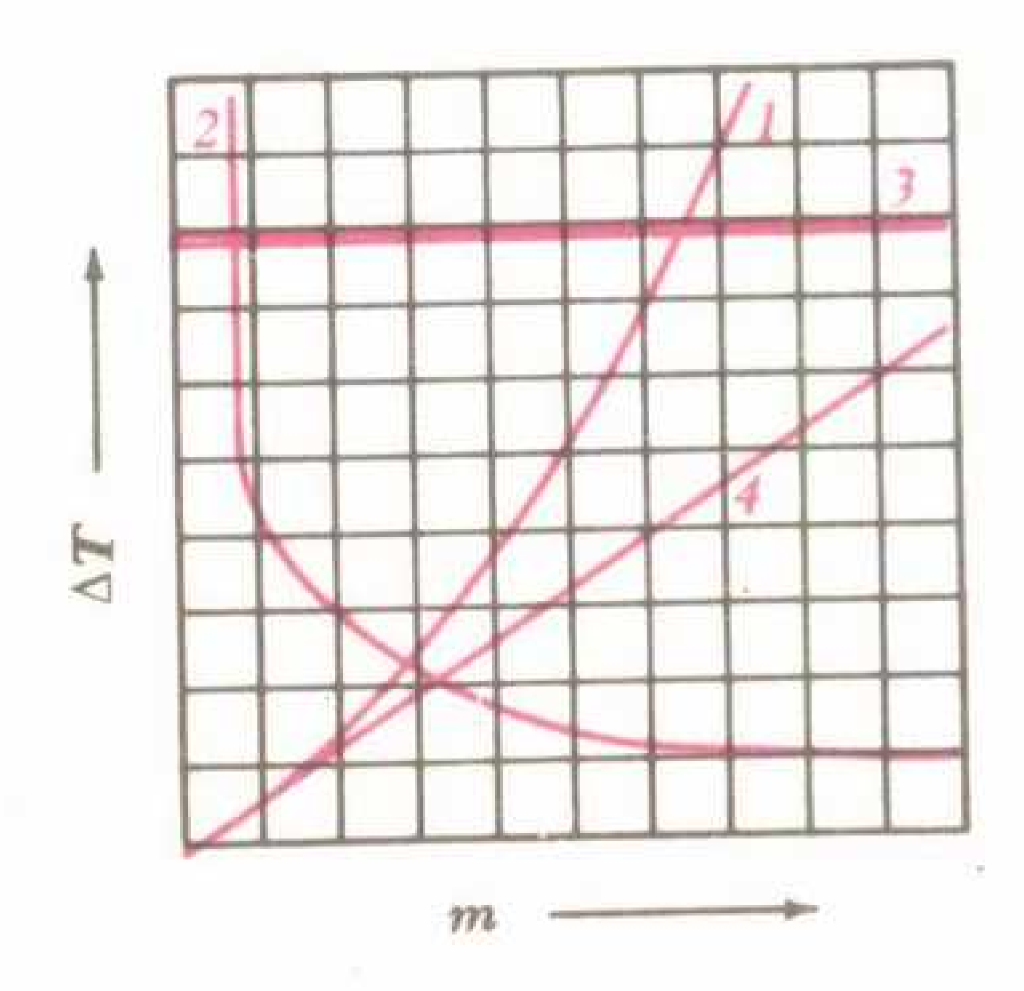
1 Nuestra dieta diaria requiere un promedio de 2.500 cal. Elíjase una.

2 En qué unidades expresaríamos el calor de combustión de una muestra de carbón? ¿Cómo se determinaría experimentalmente?

3 Suponiendo calentamiento uniforme, (*a*) ¿cuál de las dos rectas corresponde al agua? (*b*) ¿cuál corresponde al calentamiento de una masa igual de metal? (*t* es el eje de los tiempos y *T* el de temperaturas).



4



Se aplica repetidamente la misma cantidad de calor a masas de agua en aumento (*m*). ¿Cuál de las cuatro curvas dibujadas representa con más propiedad la variación de temperatura (ΔT)? Supóngase que el agua se mantiene siempre por debajo del punto de ebullición.

Problemas

1 ¿Cuántas calorías deben comunicarse a 60 g de agua para elevar su temperatura en 20°C? ¿Cuántas kilocalorías?

2 ¿Cuántas unidades térmicas inglesas (Btu) deben suministrarse a 10 libras de agua para elevar su temperatura desde 50°F hasta 75°F? ¿Cuántas calorías?

3 ¿Cuántas Kilocalorías se necesitan para elevar 2 litros de agua desde 20°C hasta 50°C?

4 ¿Cuánta cantidad de calor cede el enfriamiento de 120 g de agua desde 25°C hasta su punto normal de solidificación?

5 ¿Cuántas unidades térmicas inglesas (Btu) cede un litro de agua al enfriarse 20 grados F?

6 Suministrando 800 cal a 50 g de agua, ¿cuál será la elevación de temperatura obtenida, en grados C?

7 Comunicando 1.200 Btu a 80 libras de agua a 60°F, ¿cuál será la temperatura que alcanzará?

8 Si 100 libras de agua a 200°F ceden 3.000 Btu, ¿cuál será la temperatura a que se habrán enfriado?

9 Se calientan desde Y°C hasta Z°C, X g de agua. Exprésese la cantidad necesaria de calor (*a*) en calorías; (*b*) en Kilocalorías.

10 Se suministran M calorías a N g de agua. ¿Cuál será la elevación de temperatura en grados C?

11 ¿Cuántas unidades Btu ceden R libras de agua a S°F al enfriarse hasta T°F?

12 Calcular la temperatura de la mezcla de 150 g de agua a 10°C y 250 g de agua a 65°C.

13 Se mezclan 50 libras de agua a 150°F con 60 libras de agua a 90°F. ¿Cuál es la temperatura de la mezcla?

14 El calor específico de un determinado metal es igual a 0,1. ¿Cuántas caloría se necesitarán para elevar la temperatura de 200 g de dicho metal desde 25°C hasta 95°C?

15 Si una caloría basta para aumentar en un grado C la temperatura de 10 g de un determinado metal, ¿cuál es su calor específico?

16 ¿Cuál es el calor específico de un cuerpo si se necesitan 100 cal para elevar 50 g del mismo desde 45°C hasta 55°C?

17 El metal G tiene un calor específico igual a 0,2 mientras que el metal Y lo tiene igual a 0,1. Comparar la elevación de temperatura que experimentarán los dos metales al suministrar igual cantidad de calor a masas iguales de ambos.

TRANSMISION DEL CALOR

3

1 CONSIDERACIONES GENERALES

Acabamos de estudiar el calor como una forma de energía "en tránsito", capaz de pasar de unos cuerpos a otros. Siempre que exista diferencia de temperatura entre dos cuerpos próximos o entre porciones de un mismo cuerpo, se establecerá un flujo de calor en sentido de mayor a menor temperatura. La "corriente" de calor resultante necesita, para su propagación, algún medio de transmisión de la energía calorífica. Se conocen tres modos diferentes según los cuales puede efectuarse dicha transmisión: *conducción, convección* y *radiación*. Algunas veces se combinan dos o los tres procedimientos para transportar, cada uno en diferente proporción, una cantidad de calor de un lugar a otro.

2 CONDUCCION

La forma más simple de propagación del calor es la que tiene lugar en los metales y se basa en la presencia de *electrones libres,* que hacen de conductores del flujo calorífico. Estos electrones entran fácilmente en movimiento al calentar uno de los extremos de una varilla metálica facilitando de tal modo el paso al extremo distante de la energía cinética de los átomos que "excitan" en el trayecto. Debe tenerse en cuenta, no obstante, que en la conducción, *no se produce desplazamiento alguno de materia, considerada en conjunto.*

Obsérvese que los mismos electrones que conducen el flujo calorífico son también portadores de electricidad cuando se establece una diferencia de potencial eléctrico entre los extremos de un conductor

metálico. No debe extrañar, en consecuencia, que los metales sean buenos conductores del calor y de la electricidad. Sin embargo, hay diferencias de consideración. Por ejemplo, la conductibilidad eléctrica disminuye con la temperatura. La conductibilidad térmica, en cambio, se mantiene prácticamente constante.

Vamos a estudiar los factores que determinan la conductibilidad térmica en los sólidos. La fig. 3-1 representa una lámina metálica de superficie A y espesor, o camino que debe recorrer el flujo calorífico para atravesarla, L. Supongamos que entre las dos caras de la lámina hay una diferencia de temperatura ΔT. Se sobreentiende que permanece invariable el estado físico del cuerpo que forma la lámina.

La experimentación demuestra que, para un cuerpo dado, el *flujo calorífico*

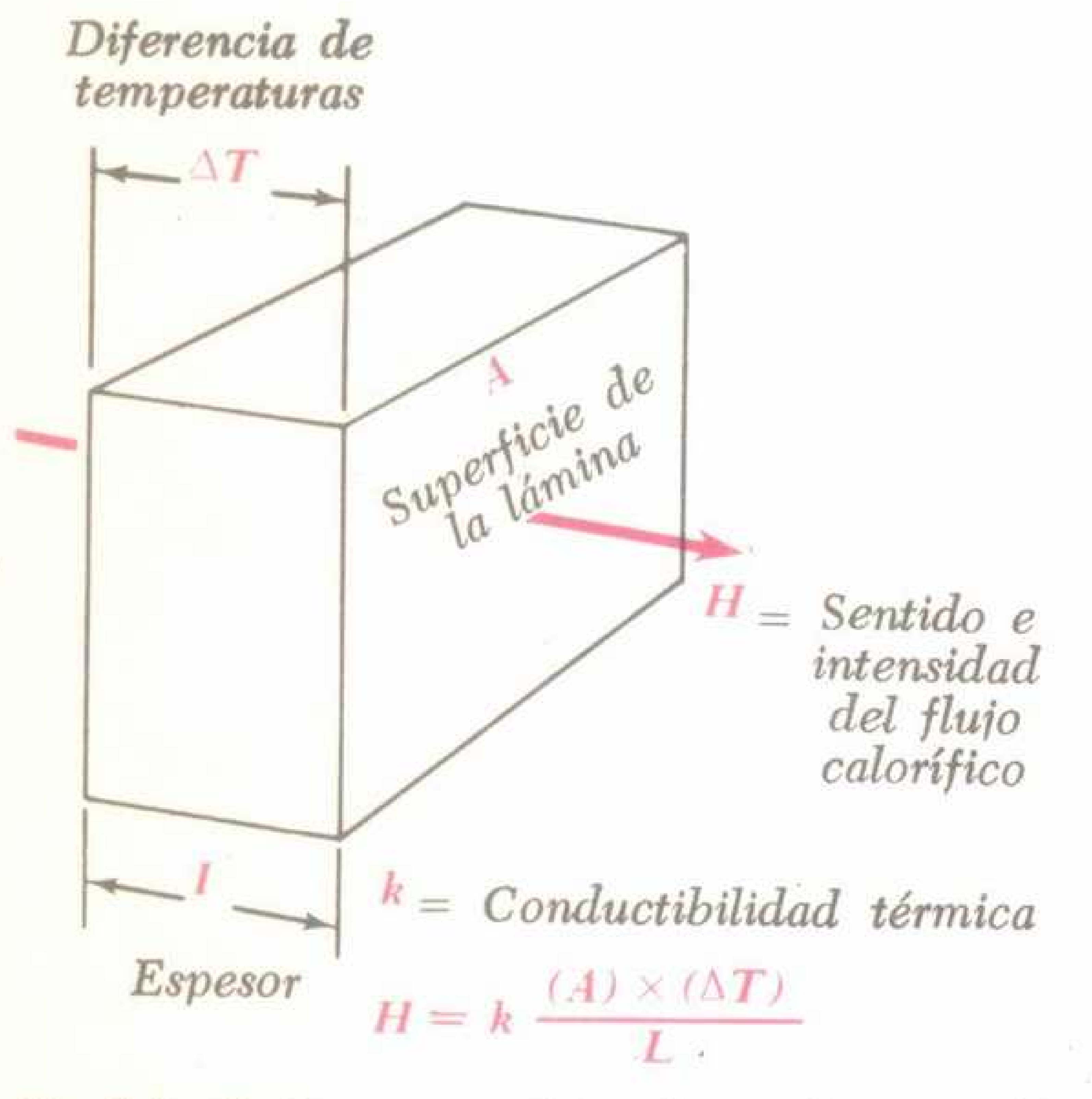


Fig. 3-1. Factores que determinan el paso del calor a través de una lámina.

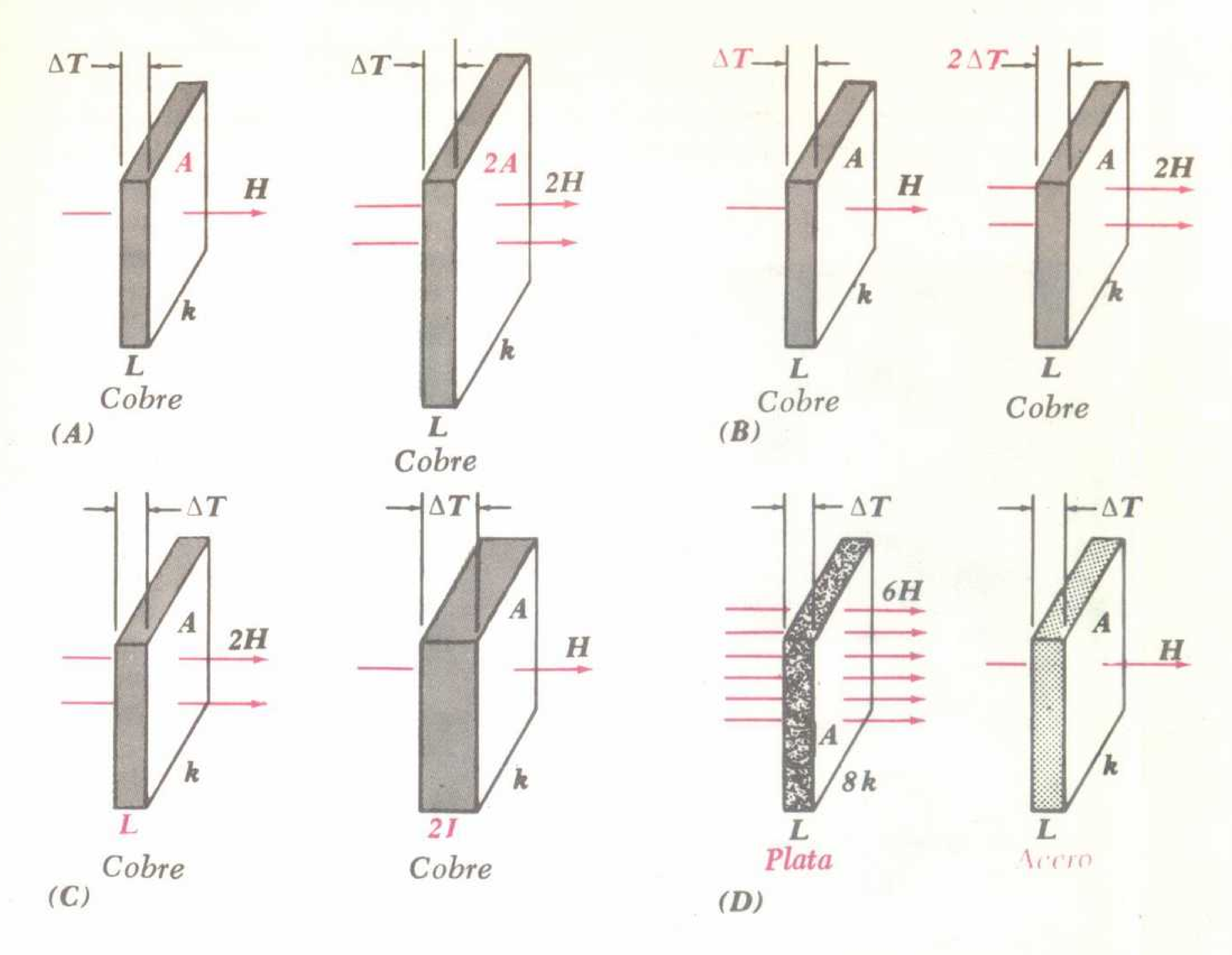
(H) *es directamente proporcional a la superficie de la lámina* (A) *y a la diferencia de temperaturas* (ΔT) entre las dos caras. Es además *inversamente proporcional* al camino que debe recorrer el flujo calorífico, o sea el espesor, (L). Dicho de otra manera, cuanto mayor sea la superficie de la lámina y la diferencia de temperaturas entre sus caras opuestas y menor su espesor, mayor será la intensidad del flujo calorífico que la atravesará. Este varía además de acuerdo con otro factor, que es la *conductibilidad térmica* (K) del cuerpo que forma la lámina, que es constante para el cuerpo considerado. Por lo tanto, permaneciendo invariables los demás factores, H tiene mayor valor para la plata y el cobre puesto que el coeficiente k es más elevado para estos metales. El valor de k para el aluminio es aproximadamente la mitad que para la plata y el correspondiente al acero, la octava parte. La conductibilidad calorífica de los sólidos no metálicos, en los cuales aquélla depende del movimiento vibratorio molecular y no de los electrones libres, es considerablemente menor. Los líquidos y los gases conducen todavía peor el calor, como veremos en seguida. En la fig. 3-2 se ilustra por separado el efecto de cada uno de los cuatro factores que interviene en la transmisión del calor. Esta puede expresarse mediante la ecuación

$$H = k \frac{(A) \times (\Delta T)}{L} \qquad (3\text{-}1)$$

3 CONDUCTORES Y AISLADORES

Un método aproximado para demostrar la conductibilidad relativa de diferentes metales, consiste en elaborar mediante los mismos, barras de la misma longitud e igual sección y ajustarlas en una cámara por la que circula vapor (fig. 3-3). Las barras se pintan con una pintura sensible a la temperatura, que cambia su color (desde el amarillo de cromo hasta un anaranjado brillante a 50°C) a una velocidad que depende de la conductibilidad del metal.

También puede comprobarse la alta conductibilidad del cobre (véase la ilustración) aplicando directamente una llama sobre una hoja de papel apretadamente envuelta sobre una barra cilíndrica de aquel metal. Este conduce el calor y no permitiendo su acumulación en el punto



A) Tenemos en este caso dos láminas de cobre del mismo espesor y con la misma diferencia de temperatura entre sus caras opuestas. La lámina de la derecha tiene una superficie igual al doble de la que tiene la de la izquierda. En consecuencia, la lámina de la derecha deja pasar doble cantidad de calor. Se indica gráficamente mediante dos flechas, señaladas $2H$, a diferencia de la flecha única y una sola H que se indica en la de la izquierda.

B) Dos láminas de cobre de la misma superficie y espesor se diferencian únicamente en el factor ΔT o diferencia de temperatura entre las dos caras opuestas. Para la lámina de la derecha, ΔT es el doble qua para la de la izquierda. Debido a ello, la lámimina de la derecha permite el paso de doble cantidad de calor que la situada a la izquierda.

C) El espesor de la lámina de la derecha es ahora doble del que tiene la lámina de la izquierda. Todos los demás factores son idénticos. En este caso, la lámina más gruesa deja pasar la mitad de cantidad de calor que la otra.

D) Dos láminas, una de plata y otra de acero, son exactamente iguales en cuanto a dimensiones y también existe la misma diferencia de temperatura entre sus caras opuestas. Debido a la mayor conductibilidad térmica de la plata (aproximadamente 6 veces mayor que la del acero), la lámina de plata deja pasar una cantidad de calor 6 veces superior a la que deja pasar la lámina de acero.

Fig. 3-2. Efecto que producen por separado cada uno de los factores que intervienen en la transmisión del calor.

donde se aplica la llama, el papel (por lo menos durante un tiempo) no llega a alcanzar su temperatura de ignición, chamuscándose apenas. Análogamente, puede tocarse con el extremo encendido de un cigarrillo un pañuelo colocado tirante sobre una moneda de plata. Si el contacto es breve, el pañuelo sale indemne. En cambio, repitiendo la prueba con el pañuelo sobre una ficha de madera (no conductora) el calor se acumula en el pañuelo, que alcanza su temperatura de ignición, entrando rápidamente en combustión.

De esto deducimos por qué se hacen

de metal los utensilios de cocina, soldadores, etc. Debido a que el cobre es mejor conductor del calor que el acero, las marmitas de acero inoxidable se construyen frecuentemente con el fondo de cobre. Los utensilios de cocina de vidrio resistente a la llama, aunque menos conductores que los metálicos, se prefieren para cocción lenta y cuando se desea que retengan el calor por largo tiempo. La punta del soldador es de cobre, para lograr una rápida transmisión del calor hacia la unión que se suelda. Por el contrario, los soportes de los utensilios de cocina y soldadores son de madera o de algún otro material aislador.

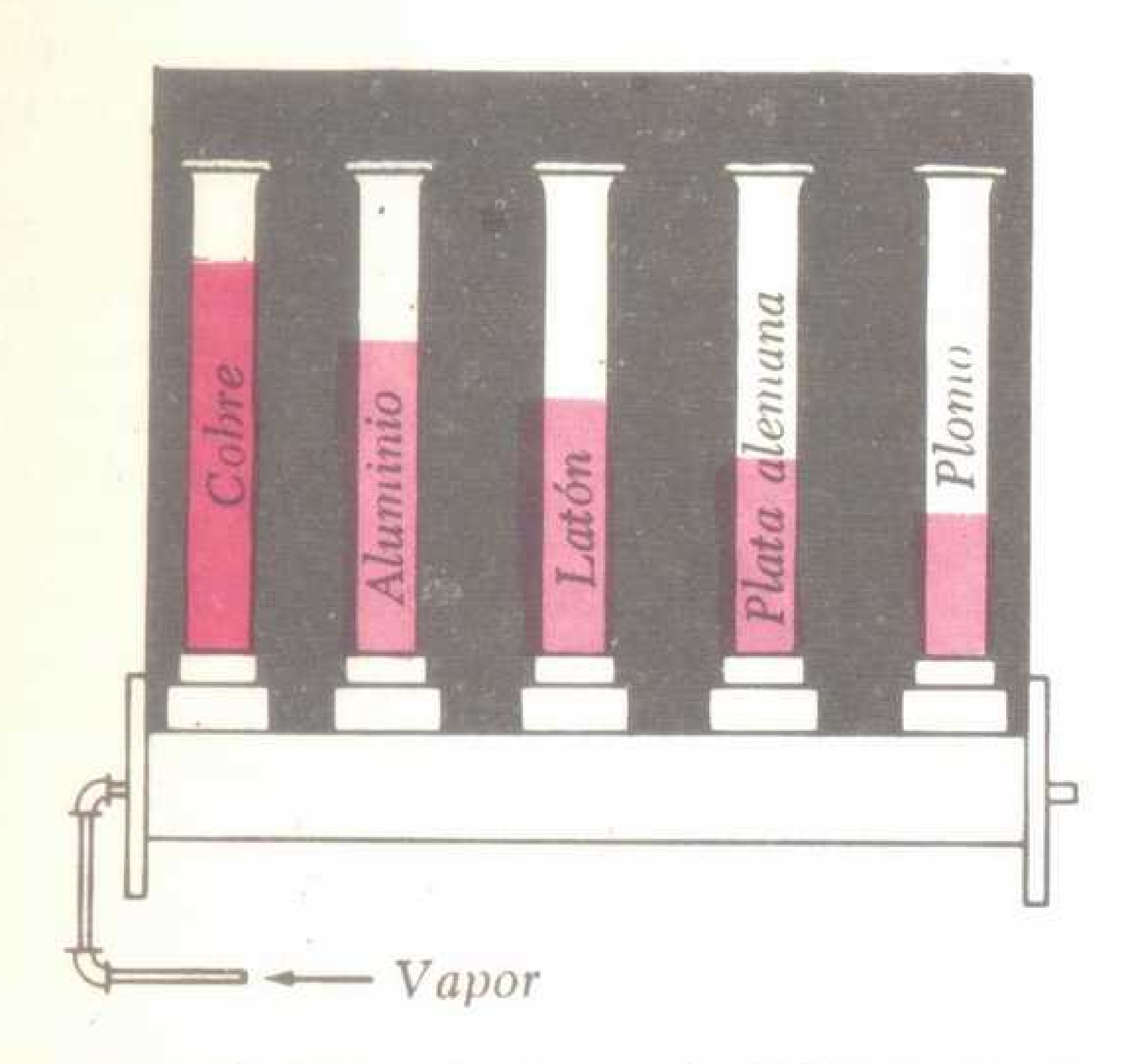


Fig. 3-3. Medición de la conductibilidad térmica valiéndose de variaciones de color. Las varillas están colocadas en orden de conductibilidad decreciente.

Exceptuando el mercurio (que es un metal), la conductibilidad calorífica de los líquidos es menor que la correspondiente a la mayoría de los sólidos. En la fig. 3-4 se muestra la poca conductibilidad calorífica del agua, viéndose un recipiente lleno de este líquido con un calentador eléctrico de inmersión colocado inmediatamente bajo la superficie. Haciendo pasar la corriente eléctrica por la resistencia, puede hacerse hervir el agua de la parte superior mientras que la del fondo se mantiene fría. El experimento debe llevarse a cabo precisamente de esta manera porque aplicando el calor al fondo de la vasija la transmisión del calor se llevaría a cabo mediante corrientes de convección que no permitirían demostrar lo que nos proponíamos.

Los gases ocupan el último lugar en cuanto a conductibilidad calorífica. Se debe a la falta de cohesión mutua de sus moléculas, por lo que solo puede tener lugar una conducción limitada a los ocasionales choques entre las mismas, muy separadas entre sí. A causa de la mayor movilidad de sus moléculas, los gases livianos, como el hidrógeno, conducen el calor mucho mejor que el aire, por lo que se utiliza para refrigerar el devanado de grandes generadores eléctricos. En cambio el freón, gas muy denso, tiene una conductibilidad calorífica equivalente a la quinta parte de la del aire. El anhídrido carbónico, otro gas pesado, tiene también poca conductibilidad calorífica, por lo que resulta buen aislador cuando se encuentra en estado sólido, formando la llamada "nieve carbónica".

Observe el lector que los mejores aisladores térmicos son los que retienen aire en sus poros o intersticios. Utilizamos la poca conductibilidad calorífica del aire encerrado en las ventanas dobles, ladrillos huecos, doble pared en los calorímetros, etc. Incluso una sencilla persiana, mantenida baja durante una tarde calurosa,

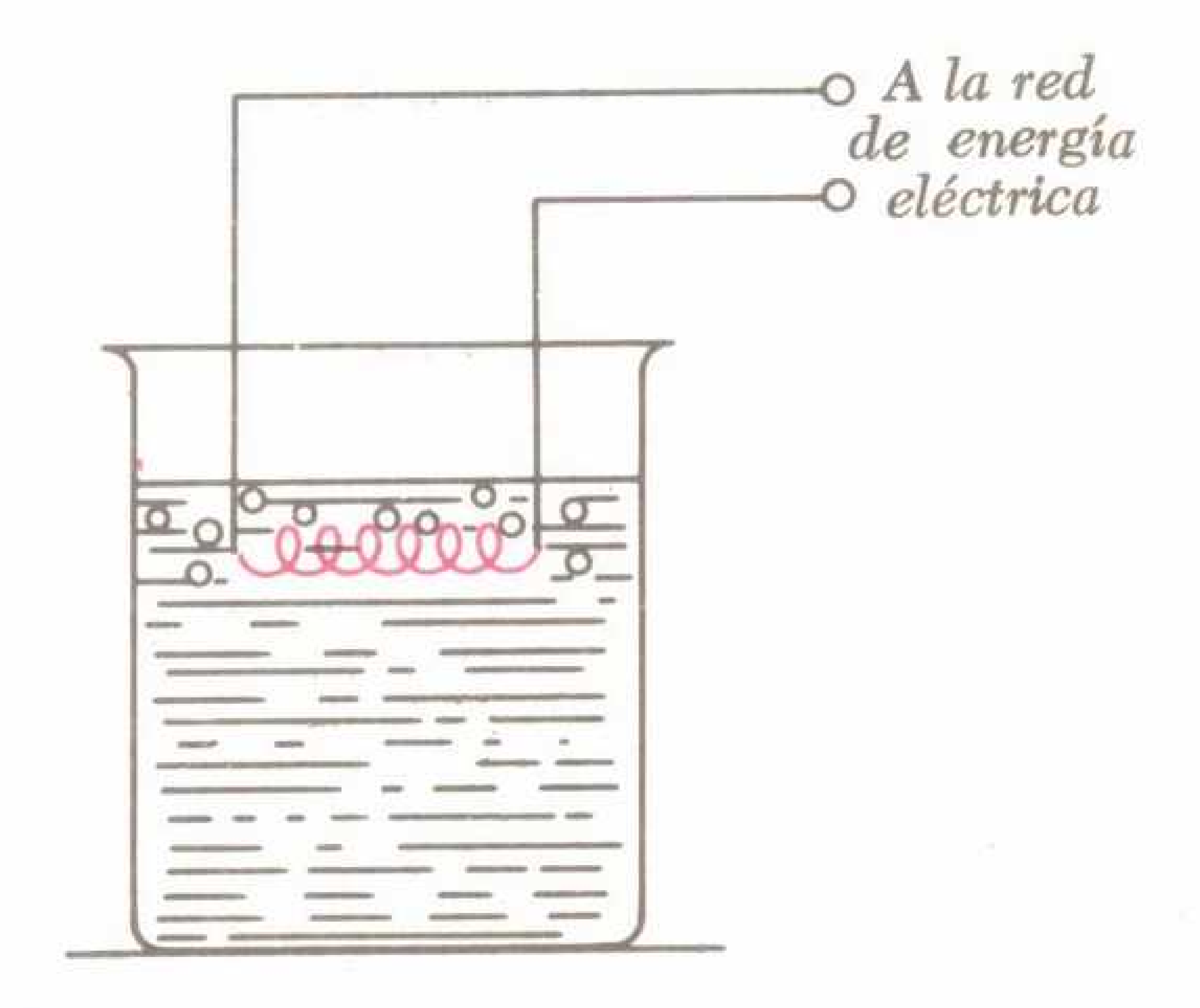


Fig. 3-4. El agua es mal conductor del calor.

mantiene fresca la habitación al interponer una capa aisladora de aire entre los paneles calientes de la ventana y la misma persiana.

En la fig. 3-5 puede verse una variedad de aisladores térmicos fabricados comercialmente. Las propiedades aisladoras de un material formado por fibras de sílice y óxido de aluminio impiden que el intenso calor del soplete llegue a las manos del experimentador, como se aprecia en la fig. 3-6, a pesar de que el espesor de este material cerámico no era superior a 1½ cm.

Se emplean aisladores térmicos formados por materiales porosos para disminuir las pérdidas de calor en las casas, las que llegan a veces al 40 %. Los hornos y las tuberías de vapor se aislan frecuentemente mediante capas de amianto y también mediante un material formado por amianto y óxido de magnesio. Los recipientes portátiles para mantener frías o calientes las comidas, están hechos con fibra de vidrio, o materiales plásticos especiales ("telgopor"). Las paredes de los refrigeradores domésticos se aislan mediante lana de vidrio u otros materiales que contienen aire de manera que no pueda circular. También se rellenan de hoja de aluminio arrugada, aislador con propiedades reflectantes, que estudiaremos en seguida.

Es interesante observar que los aisladores térmicos pierden sus propiedades a temperaturas extremadamente elevadas, conduciendo entonces el calor. Los ladrillos refractarios de sílice dejan de ser aisladores a 1.760°, la albúmina (óxido de aluminio) a 1.980°C y la magnesia (óxi-

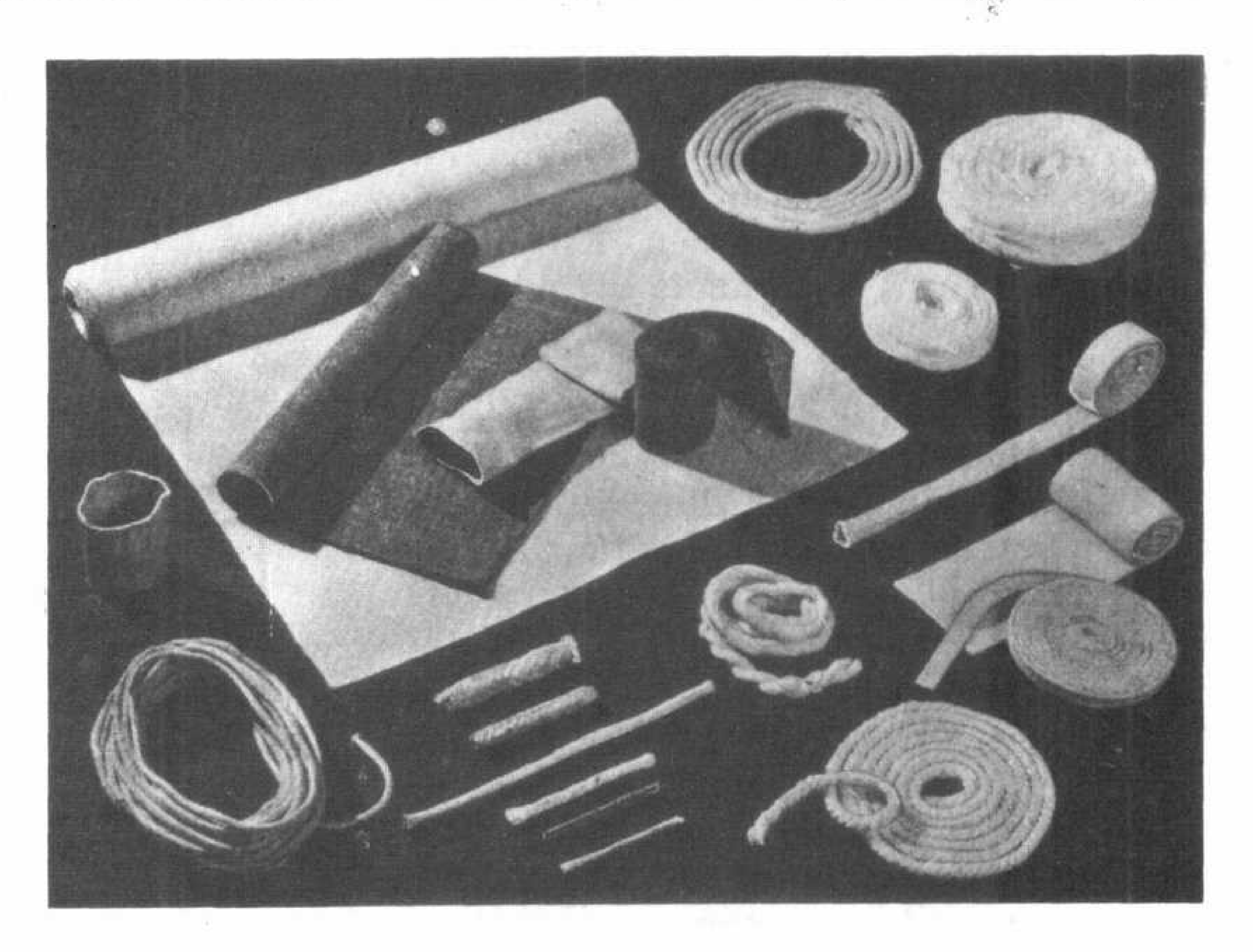


Fig. 3-5. .Conjunto de aisladores térmicos.



Fig. 3-6. Un espesor de apenas 13 mm de un tejido de fibras cerámicas protegen la mano del operador de la temperatura superior a 900°C que produce el soplete.

do de magnesio) a 2.200°C. El único *no conductor perfecto* es el vacío, puesto que carece de portadores de flujo calorífico.

4 CONVECCION

Si el proceso de transmisión de calor tiene lugar mediante desplazamiento real de partes calientes y frías del cuerpo, estamos en presencia de un sistema de propagación llamado *convección*. Es *natural* cuando se debe a la diferente densidad de porciones próximas de un fluido determinado. La convección es *forzada* si se ayuda mediante ventiladores u otras máquinas sopladoras.

Es posible observar directamente las corrientes de convección. La fig. 3-7 representa un tubo de vidrio doblado en forma rectangular, lleno de agua y calentado por uno de sus lados. Se le añade una pequeña cantidad de tinta roja o de per-

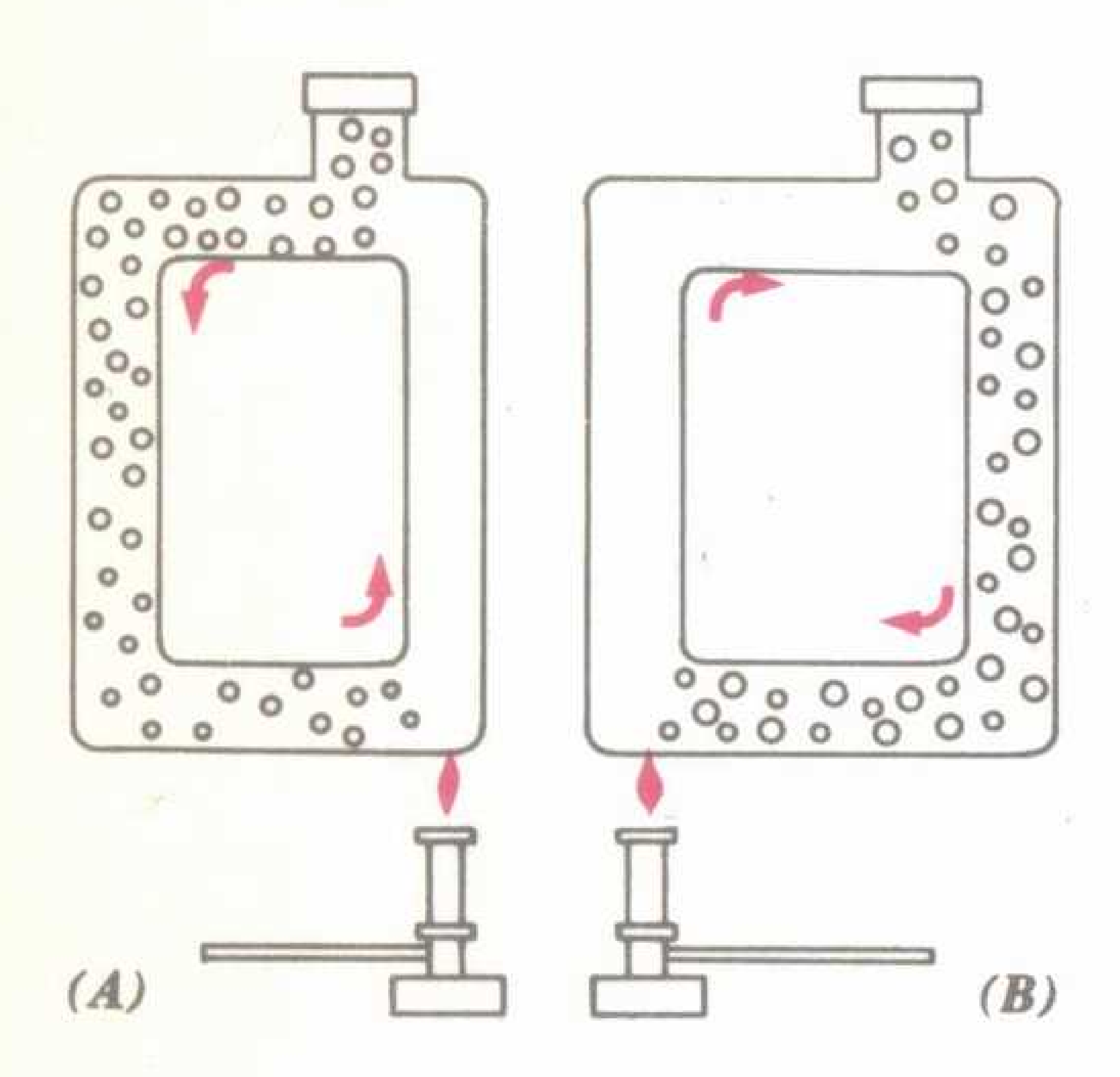


Fig. 3-7. Corrientes de convección formadas en un recipiente de forma rectangular. (A) En sentido contrario al movimiento de las agujas del reloj. (B) En el sentido del movimiento de las agujas del reloj.

manganato potásico, para hacer visible las corrientes de convección. En la parte A del diagrama ,el sentido de circulación de la corriente de convección es contrario al movimiento de las agujas del reloj; en la parte B, es igual a éste. En ambos casos, la parte fría del fluido (más densa) va al fondo, obligando al agua caliente (menos

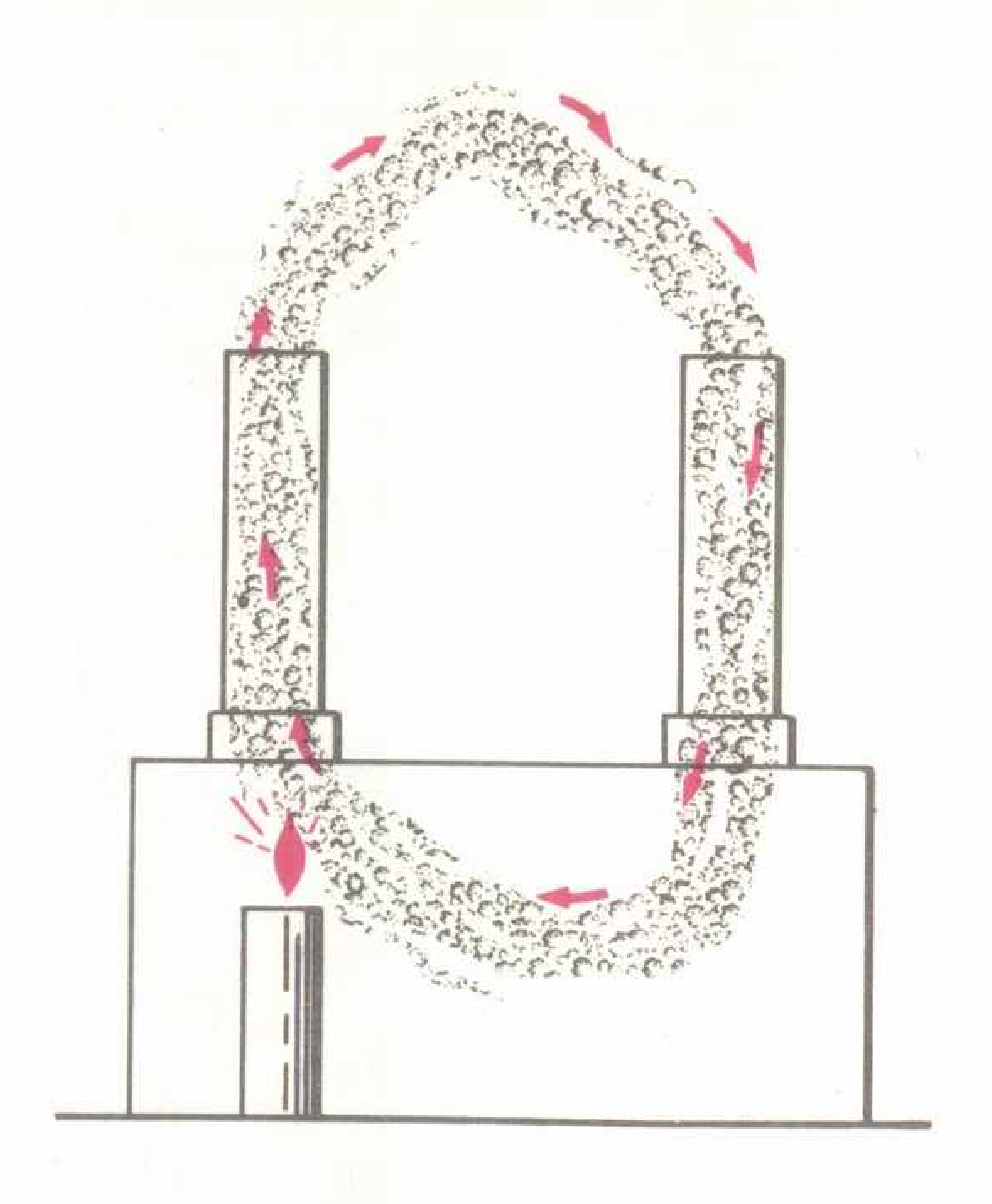


Fig. 3-8. Haciendo visibles las corrientes de convección mediante humo.

densa) a desplazarse hacia arriba. Pasado un tiempo, toda la masa de agua adquiere temperatura uniforme.

Las corrientes de convección pueden también hacerse visibles al calentar un gas (fig. 3-8). El diagrama representa dos tubos de lámpara colocados sobre orificios practicados en una caja metálica. Se dispone una vela encendida dentro de la caja, directamente bajo el tubo de la izquierda. El aire relativamente más denso (frío) del tubo de la derecha va hacia el fondo, obligando al aire menos denso (caliente) a ascender por el otro tubo. Se hace visible la circulación del aire mediante tiras encendidas de papel salitre puestas sobre cada tubo. Pasando la bujía al tubo de la derecha, se invierte el sentido de circulación de la corriente.

Como ejemplos de convección natural, tenemos el tiraje de las chimeneas, las corrientes ascendentes y descendentes que

se encuentran en la navegación aérea y en general, el movimiento del aire que da lugar a los vientos. Las corrientes *ecuatorial* y *polar* (fig. 3-9) servirán de ejemplo.

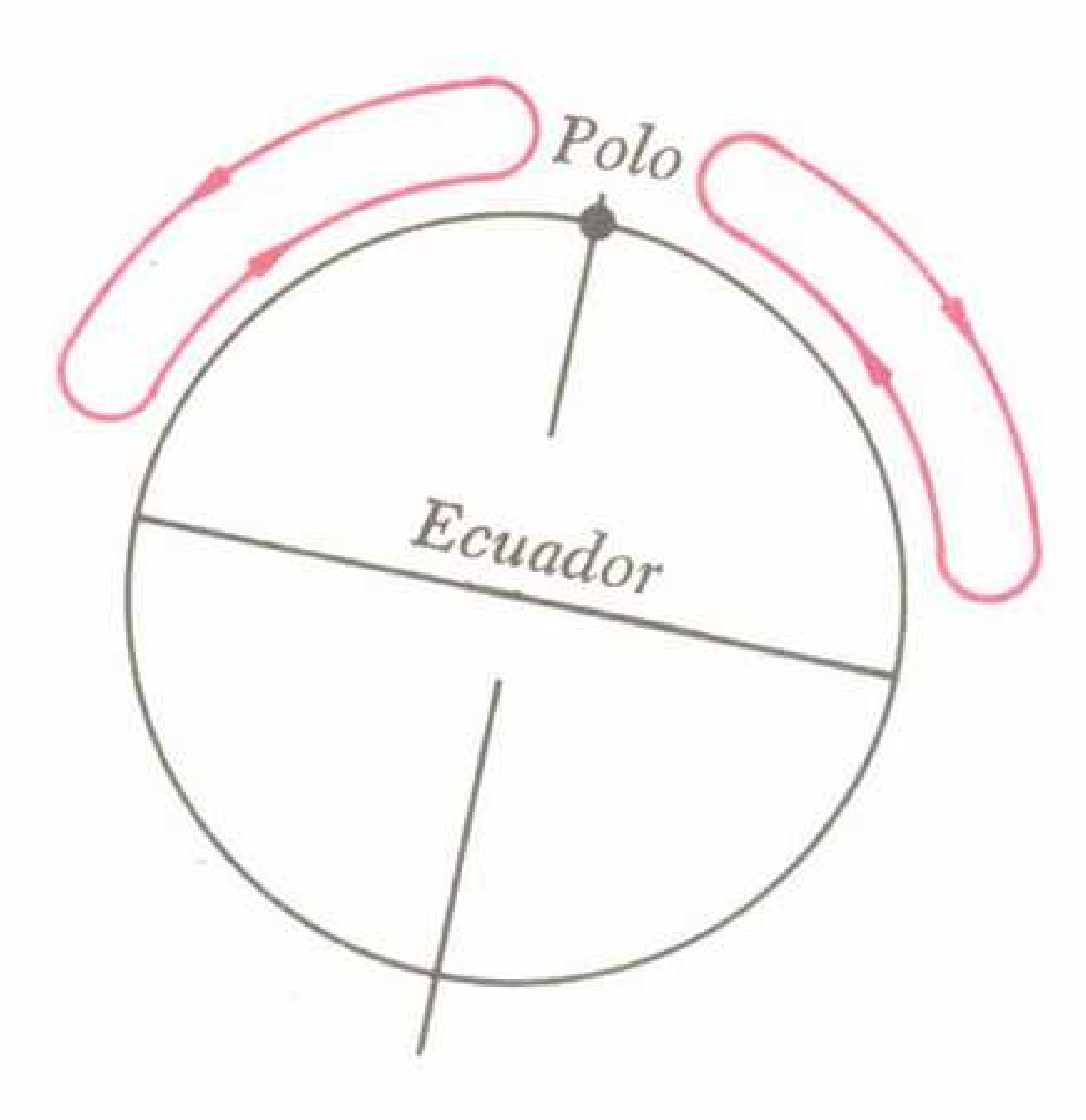


Fig. 3-9. Corrientes de convección (vientos) entre el ecuador y el polo norte.

Las masas de aire calentadas en las regiones ecuatoriales forman corrientes que siguiendo la superficie de la tierra, llegan a los polos donde reemplazan al aire polar frío, que se dirige hacia el ecuador. De la misma manera, la corriente del Golfo transporta agua ecuatorial caliente hacia los polos, modificando notablemente el clima de la costa oriental de los EE.UU. de Norteamérica, Terranova, Labrador e Islas Británicas.

Si la transmisión de calor se debe principalmente a la convección, puede determinarse su cantidad, en primera aproximación, mediante la ley de Newton, según la cual la cantidad de calor aportada por un fluido caliente a los cuerpos más fríos que lo rodean, *es proporcional a la diferencia de temperatura entre el fluido y el medio que lo rodea.* Por lo tanto, la transmisión de calor será doble si la diferencia de temperatura es de 40° que si fuera solamente de 20°. Cuando se observa que no se cumple esta ley, la transmisión de calor obedecerá también a otra causa, que estudiaremos en la próxima sección. El movimiento complejo de los fluidos afecta también la precisión de la ley de Newton.

5 RADIACION

Los cuerpos pueden ceder su energía interna propagándola a través del espacio vacío o inmaterial. Denominamos *radiación* a esta forma de transmisión de energía calorífica. En este proceso no interviene, evidentemente, el movimiento de electrones libres, vibraciones moleculares, desplazamiento de redes cristalinas ni cambio de lugar de la misma materia. En su lugar, los portadores de energía radiante son *ondas electromagnéticas* de diversa longitud de onda (distancia entre crestas). Estas ondas, llamadas también *infrarrojas* (cuya longitud de onda es mayor que la del rojo visible) se propagan a través del espacio con la velocidad de la luz, o sea 300.000 km por segundo, o 3×10^{10} cm/seg. Pasan fácilmente a través de ciertos cuerpos transparentes a las radiaciones o *diatérmanos* (vidrio, cuarzo) pero se reflejan o son absorbidas por los cuerpos opacos a la radiación o *atérmanos* (metales, ladrillos, telas negras). En la fig. 3-10 se representa gráficamente esta distinción. Una vez absorbida, la energía se transforma en calor sensible.

Otra teoría considera que los portadores de la radiación son diminutos "paquetes" o *cuantos* de energía radiante. Ambos puntos de vista se complementan entre sí y se utilizarán en el texto. Hasta el comienzo de este siglo, se consideraba que el flujo de energía tenía lugar de manera continua. Se ha añadido actualmente el concepto de que la energía puede ser también *discreta,* o de composición *discontinua.*

Todos los cuerpos irradian calor a los otros. Los que están en equilibrio térmico con respecto al medio que los rodea, irradian y reciben calor en la misma proporción. *La energía radiante* emitida por un cuerpo, es *proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta.* En la ley de Stefan-Boltzmann, que en forma simbólica expresa que E o energía radiante emitida por unidad de superficie es proporcional a T^4. Por lo tanto, duplicando la temperatura absoluta, la energía radiante emitida aumenta, 2^4 o sea 16 veces; triplicando aquélla, la energía aumen-

ta 3^4 o sea 81 veces. Para pequeñas cantidades de energía emitida, la energía radiante toma la forma de ondas *infrarrojas,* de mucha longitud de onda. Al aumentar la temperatura, la máxima energía irradiada se desplaza hacia la porción de menor longitud de onda (visible) del *espectro electromagnético,* cuyos colores varían gradualmente desde el rojo al amarillo y al azul. A temperaturas muy elevadas, se emiten simultáneamente radiaciones de diferentes longitud de onda, apareciendo el color que llamamos rojo blanco. La fig. 3-11 ilustra las variaciones de las principales longitudes de onda que acompañan la producción de energía radiante a diferentes temperaturas. Recuérdese que a menor temperatura, mayor longitud de onda de la radiación emitida; inversamente, cuanto mayor sea la temperatura, menor la longitud de onda (ley del desplazamiento, de Wien). La tierra, cuya temperatura superficial media es de 300°K, emite la máxima energía a una longitud de onda de unas 10 micras (μ) ($1\,\mu = 10^{-6}$ m). El sol, con una temperatura en la superficie de unos 6.000°K, irradia la mayor cantidad de energía en una longitud de onda de 0,5 micras.

Emisor perfecto o ideal sería el cuerpo capaz también de *absorber* perfectamente la energía radiante (ley de Kirchhoff). Llamamos *cuerpo absolutamente negro* al que emite y absorbe de manera perfecta la energía radiante, pero no tiene poder alguno de reflexión. La variedad conocida con el nombre de *negro de lámpara,* dentro del negro de humo, es el cuerpo que más se acerca a tal requerimiento: emite y absorbe cerca del 97 % de la radiación posible total, reflejando solamente el 3 %. En cambio, el cobre pulido emite (y absorbe) el 7 % de la radiación total, reflejando el 93 %. Un pequeño orificio practicado en un recipiente totalmente cerrado (fig. 3-12) representa una excelente aproximación al cuerpo absolutamente negro, puesto que las paredes absorben prácticamente toda radiación que atraviesa el orificio, no pudiendo salir al exterior ni reflejarse a través del mismo.

La radiación absorbida por una superficie depende del ángulo según el cual incide la energía radiante. Cuanto más se aproxime este ángulo a 90°, tanto mayor será la energía radiante absorbida (manteniéndose constantes los demás factores). Debido a la mayor inclinación de los rayos solares en las regiones polares y el mayor espesor de la atmósfera que deben atravesar, la cual también absorbe energía, es menor la que se recibe por unidad de su-

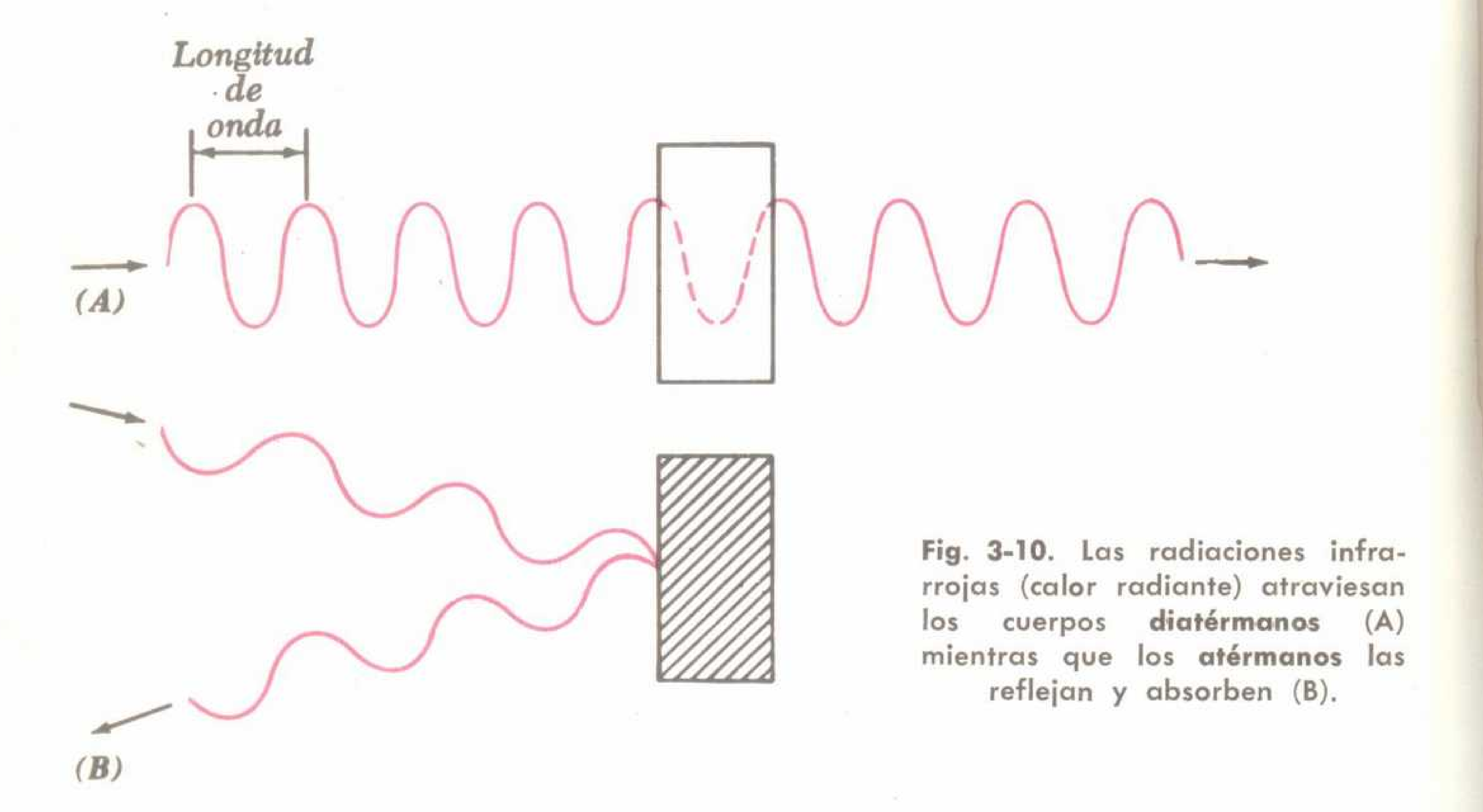


Fig. 3-10. Las radiaciones infrarrojas (calor radiante) atraviesan los cuerpos **diatérmanos** (A) mientras que los **atérmanos** las reflejan y absorben (B).

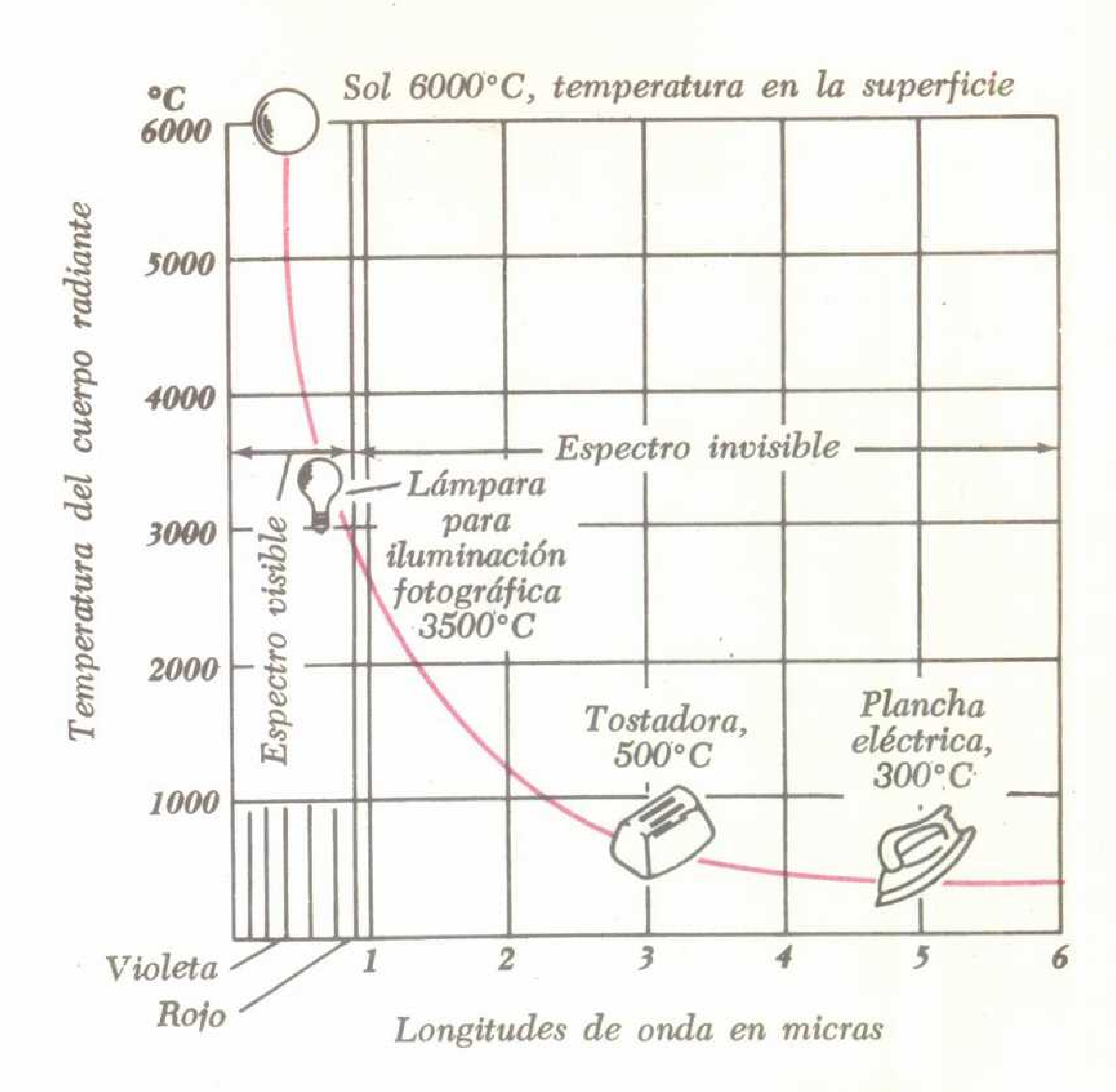


Fig. 3-11. Variación de la longitud de onda (color) según la temperatura del cuerpo radiante.

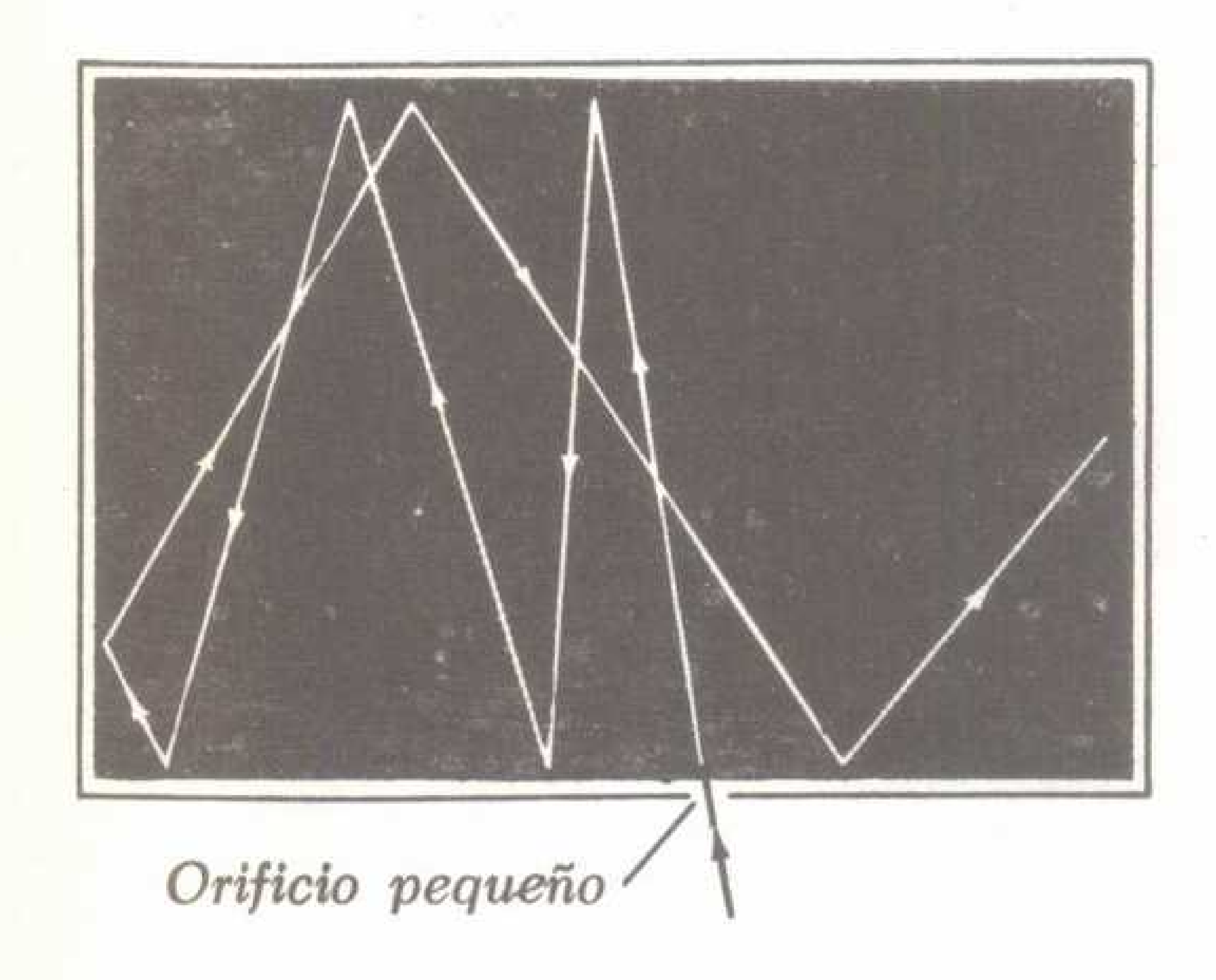


Fig. 3-12. Una buena aproximación al cuerpo absolutamente negro. Absorbe prácticamente toda la radiación que entra.

perficie en el ártico que en las zonas tropicales (fig. 3-13).

La clase de superficie determina asimismo la cantidad de energía radiante absorbida (o emitida). El *cubo de Leslie* (fig. 3-14) permite comparar cómodamente la emisión de diferentes clases de superficie a la misma temperatura. Es una caja hueca de latón que se llena con agua a unos 100°C. Una de las caras está recubierta con negro de lámpara, otra con una pasta de yeso y alcohol (blanco), la tercera pintada con algún otro color y la cuarta se deja pulida. Frente a cada una de las

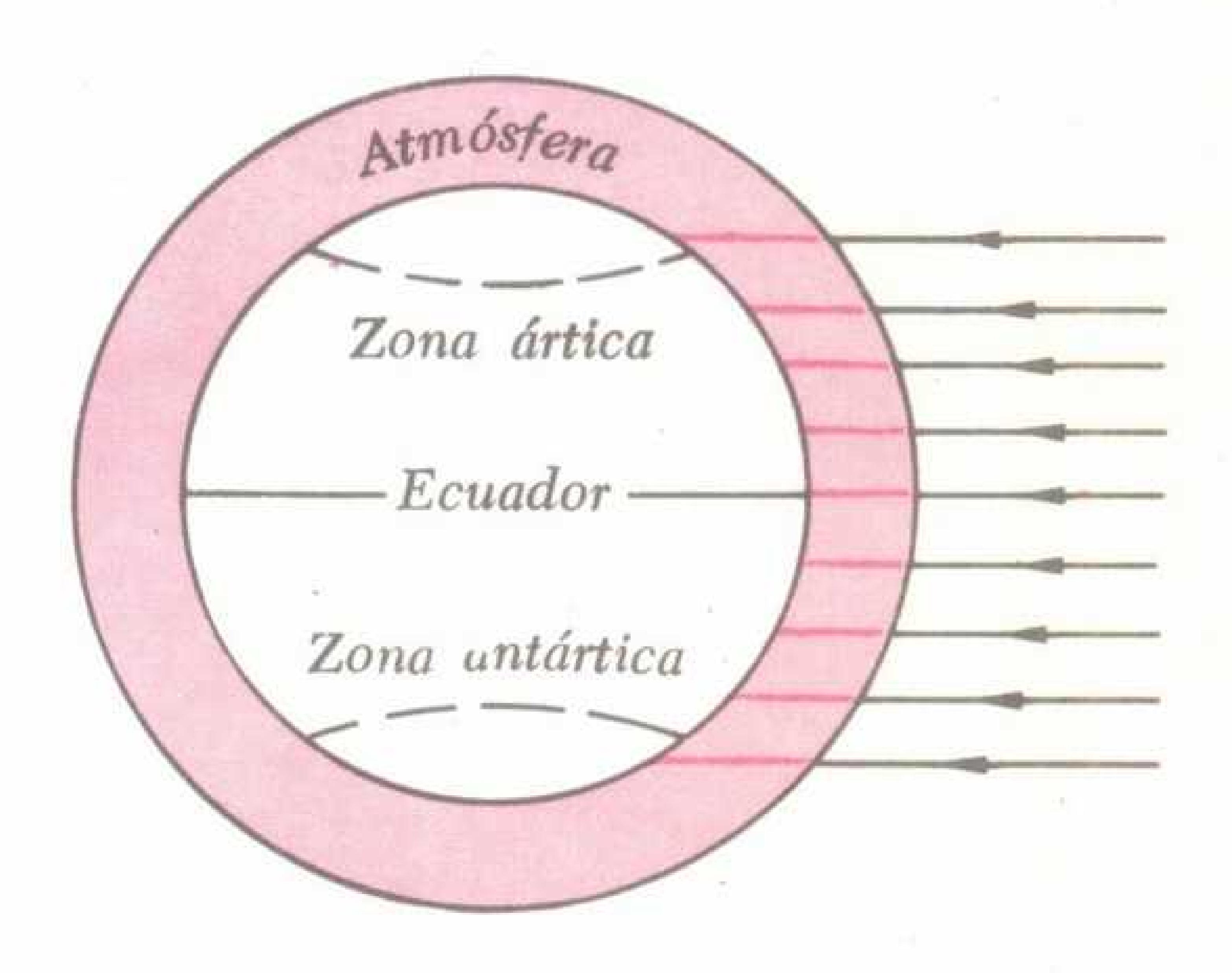


Fig. 3-13. Efecto del ángulo de incidencia y del espesor de la atmósfera sobre la radiación absorbida proveniente del sol.

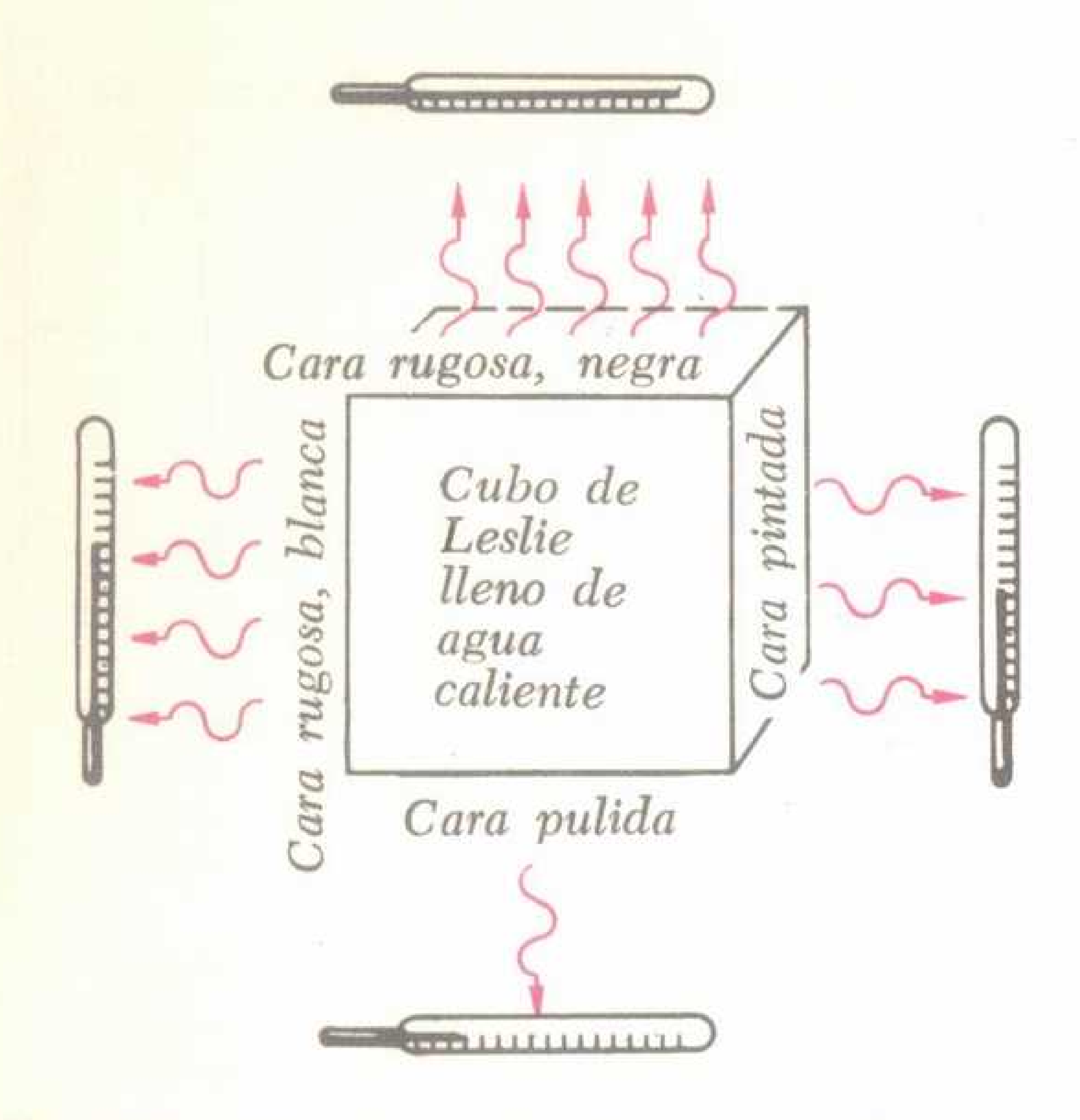


Fig. 3-14. Cubo de Leslie. (El número de líneas onduladas, así como la lectura de los termómetros, es aproximadamente proporcional a la radiación emitida).

cuatro caras se colocan termómetros de mercurio cuyos depósitos están ennegrecidos con negro de lámpara, leyéndose periódicamente su temperatura a medida que el agua se enfría.

Se observa que la mayor emisión corresponde a la cara recubierta con negro de humo, *negra* y *rugosa*. Sigue, en orden decreciente, la cara recubierta con yeso, *blanca* y *rugosa*, luego la *coloreada* y finalmente la *pulimentada*. Se deduce que las superficies *rugosas* emiten y absorben mejor la energía radiante. Las superficies *pulimentadas* o *brillantes*, son peores emisores y absorbedores de energía radiante.

La rugosidad y textura de la superficie parece tener mayor importancia que el color.

Este principio tiene muchas aplicaciones interesantes. Los radiadores de vapor, esencialmente dispositivos de *convección*, calientan la habitación únicamente en parte por radiación. Su limitada potencia de irradiación (solamente el 30 % de la emisión total) puede aumentarse aplicando una pintura rugosa, de mucho poder emisivo. Es, pues, equivocada la costumbre de pintar los radiadores mediante purpurinas, pinturas que reflejan el calor. El amianto, cuya textura es rugosa, es en realidad un radiador mucho mejor que el tubo metálico brillante que recubre. Por lo tanto, conviene aumentar el espesor del recubrimiento hasta unos 5 cm por lo menos, pa-

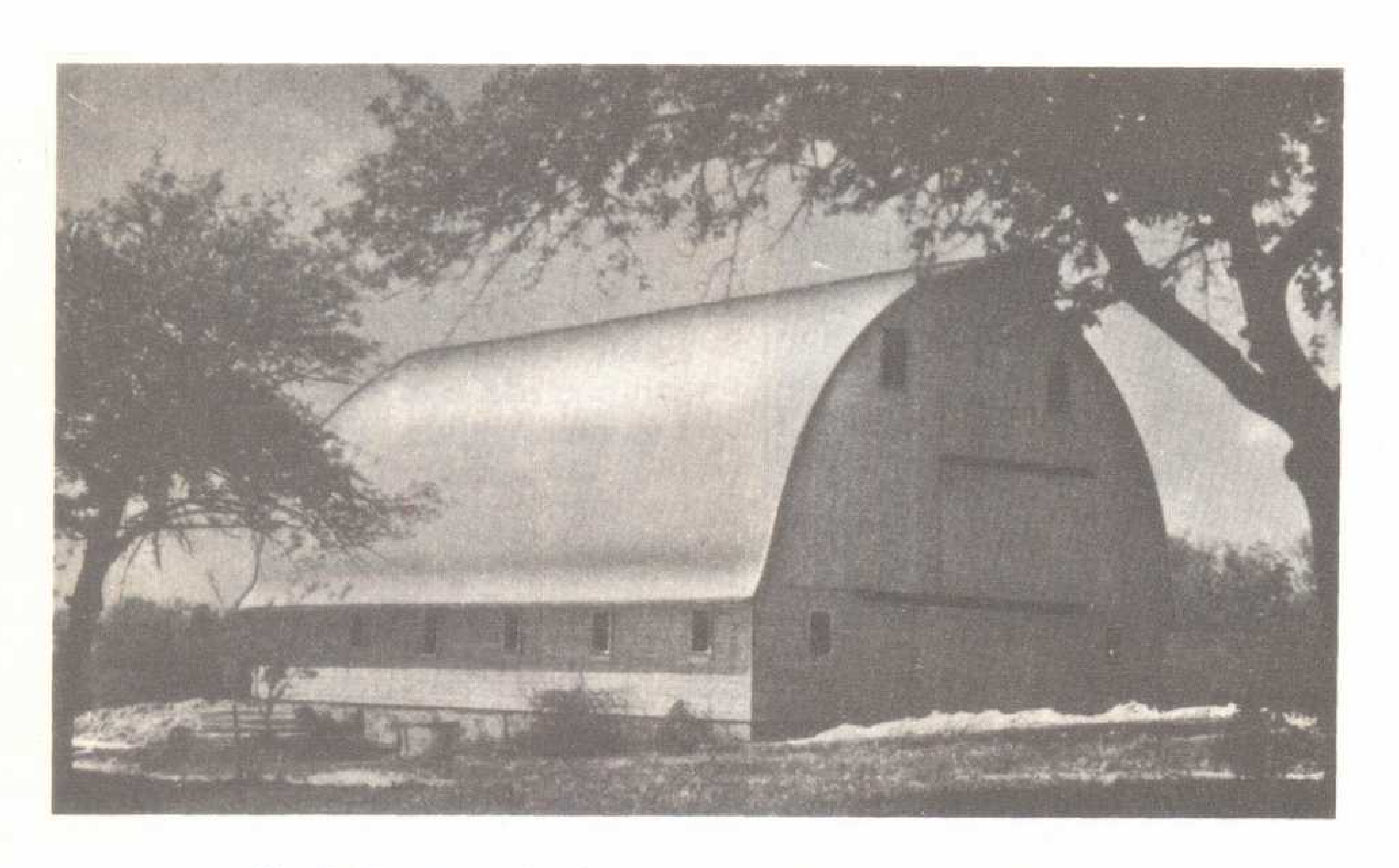


Fig. 3-15. Un techo metálico es aislador por reflexión.

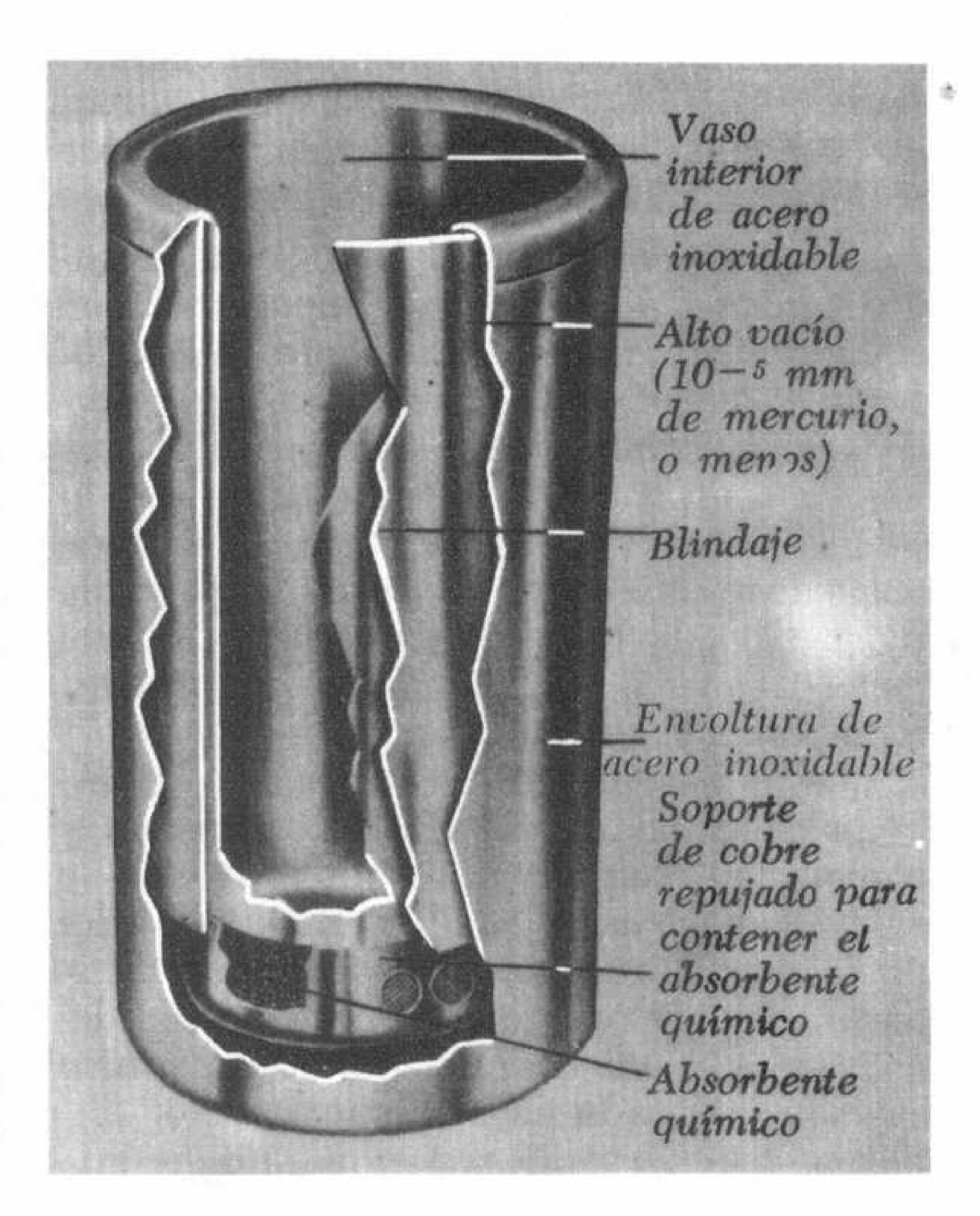


Fig. 3-16. Vaso Dewar abierto, utilizado para aire, oxígeno, nitrógeno y argón líquidos.

ra que su eficacia como aislador compense su predisposición a irradiar el calor que se trata de ahorrar.

Cuando se utilizan pinturas de aluminio, por ejemplo para recubrir depósitos de almacenamiento de combustibles líquidos, es con el objeto de disminuir la radiación que si no fuera por eso absorbería del sol. La fig. 3-15 muestra el techo de aluminio de un granero, cuyo propósito es *aislar por reflexión* su contenido. Por el mismo motivo se usa papel de aluminio, arrugado, en las paredes de los refrigeradores. Además, los espacios de aire que deja el papel metálico arrugado disminuye

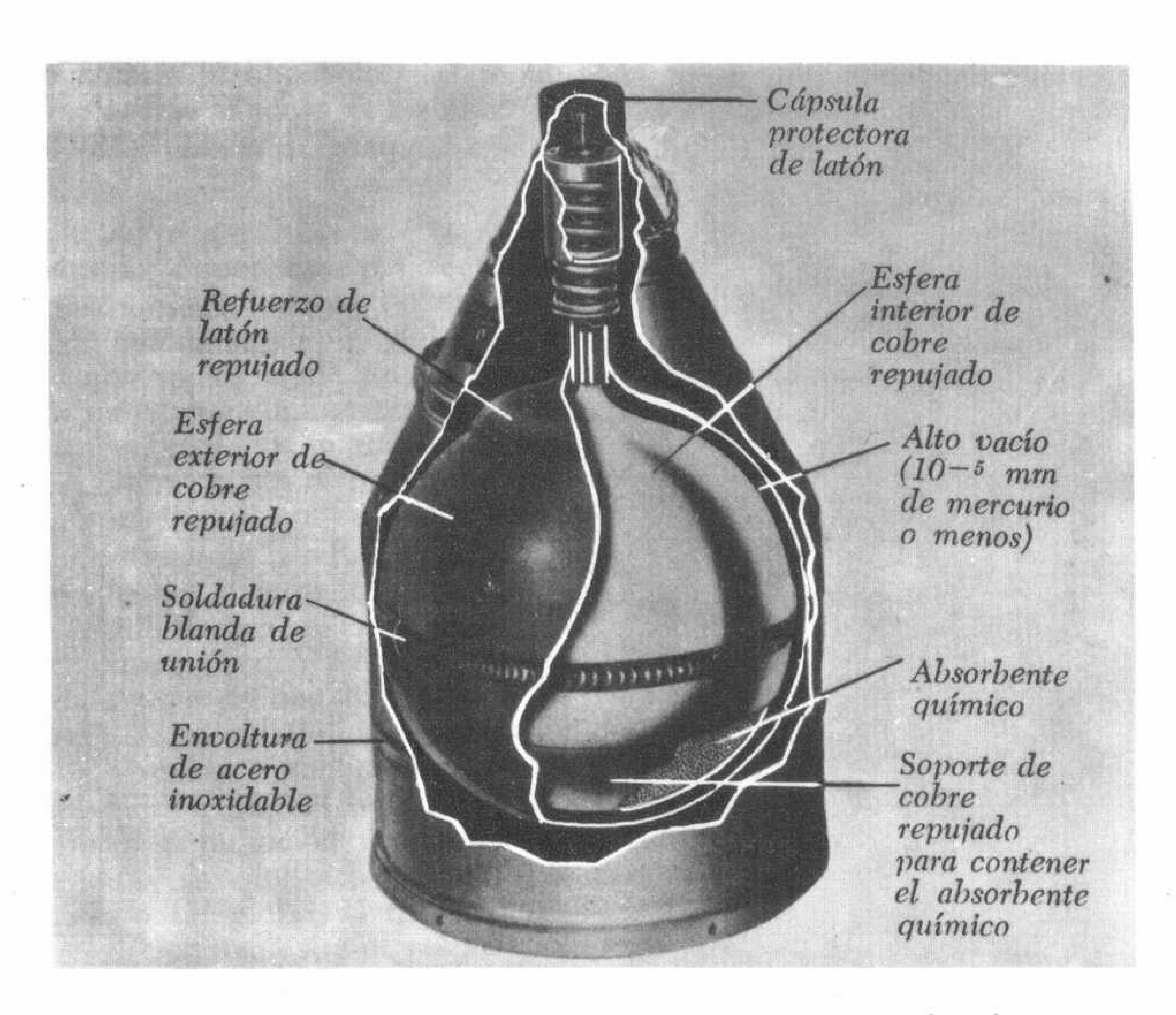


Fig. 3-17. Recipiente para guardar nitrógeno u oxígeno líquidos.

las pérdidas de calor por conducción y convección. Otra plicación la encontramos en la delgada capa de oro o plata con que se recubren los satélites artificiales.

El almacenamiento y transporte de gases licuados —de mucha importancia en el campo rápidamente creciente de la criogenia o investigaciones relativas a muy bajas temperaturas— hace indispensable disminuir a un mínimo la transmisión de calor radiante. El vaso abierto Dewar de acero inoxidable que se ve en corte en la fig. 3-16, está formado en esencia por una vasija dentro de otra, unidas únicamente en la boca y separadas por un espacio en el que se ha hecho un alto vacío para impedir pérdidas de calor por conducción y convección. Las pérdidas por radiación se evitan por las propiedades reflectantes del acero que forma las vasijas interior y exterior. Se mejora todavía la eficacia del recipiente mediante un *blindaje térmico* especial colocado en el espacio vacío.

La fig. 3-17 representa un frasco Dewar de cierre no hermético para el transporte de oxígeno, nitrógeno o aire líquidos. El contenido del frasco permanece en esta forma durante un tiempo notablemente prolongado.

6 "GEOMETRIA" DE LA RADIACION

Las ondas de calor radiante se comportan análogamente a las ondas luminosas en cuanto pueden *reflejarse, refractarse* (quebrar su trayectoria rectilínea) y enfocarse (concentrarse en un punto). La fig. 3-18 representa un espejo metálico cóncavo (*A*) en cuyo foco óptico (y también *térmico*) se ha colocado una esfera de hierro caliente. Los rayos caloríficos divergentes inciden sobre el espejo, reflejándose según un haz paralelo. Haciendo incidir este haz sobre otro espejo cóncavo (*B*) que tiene un trocito de fósforo en su foco, el haz converge y concentrándose sobre el fósforo, la hace arder.

Podemos refractar y enfocar los rayos infrarrojos (que constituyen la radiación térmica) haciéndolos pasar a través de una "lente" especial, consistente en un matraz lleno de una solución de iodo en sulfuro de carbono. Se concentra la solución hasta que sea opaca para los rayos de luz visible, pero permita el paso de la radiación infrarroja, de mayor longitud de onda. Colocando el matraz en la trayectoria seguida por la radiación que emite una lámpara de arco (fig. 3-19), los ra-

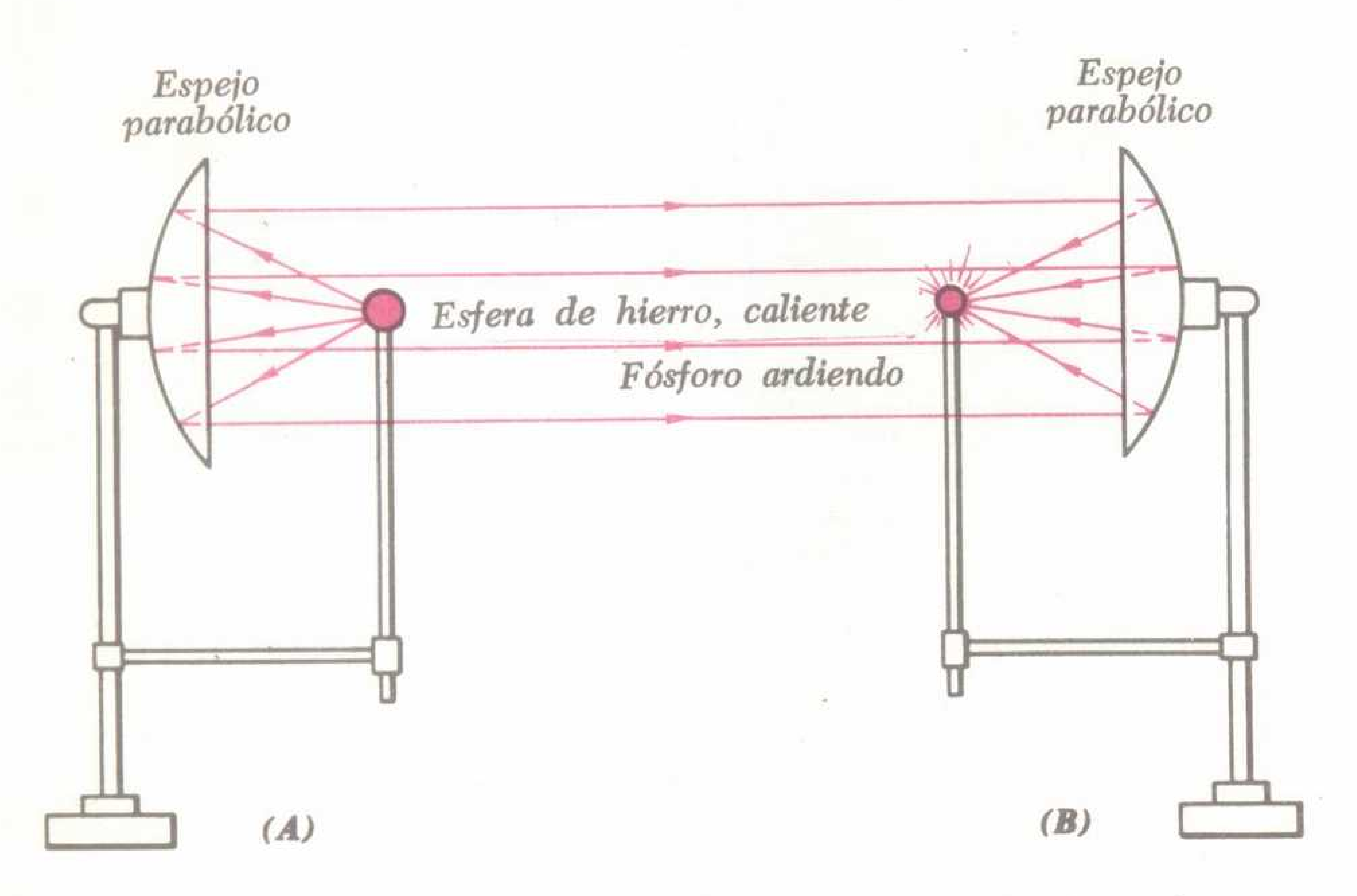


Fig. 3-18. Reflexión y concentración o enfoque de un haz de calor radiante.

yos infrarrojos convergen en el foco de la "lente", punto que puede determinarse rápidamente mediante un termómetro con el depósito ennegrecido.

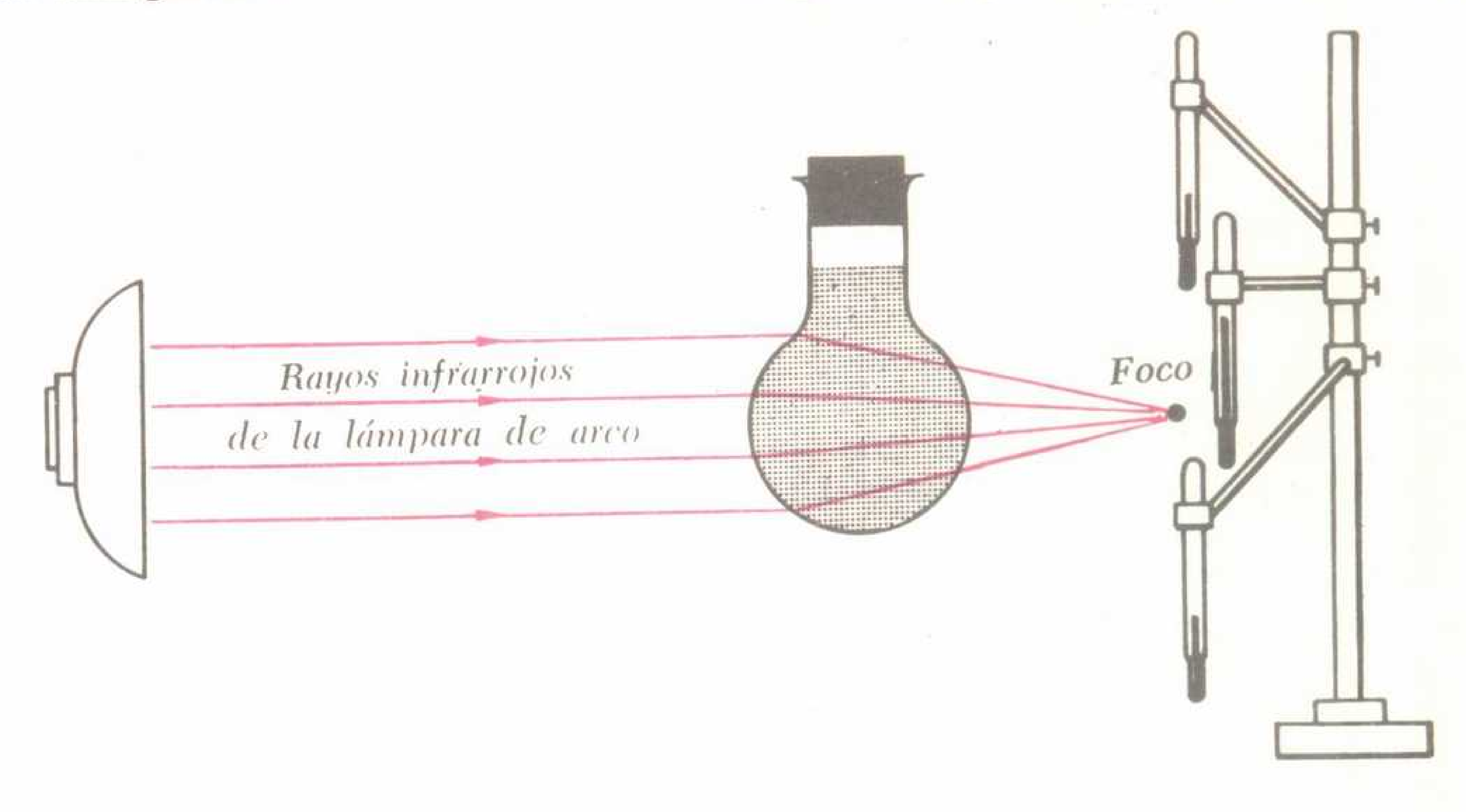


Fig. 3-19. Enfoque de un haz de rayos infrarrojos mediante un matraz lleno de una solución de iodo en sulfuro de carbono.

7 DETERMINACION DE LA PRESENCIA DEL CALOR RADIANTE

El *radiómetro de Crookes* (fig. 3-20) es un delicado dispositivo que se utiliza para demostrar la presencia de calor radiante. Está formado por un globo de vidrio en el que se ha hecho un vacío parcial, hasta unos pocos milímetros de mercurio, dejando por lo tanto trazas de aire. Dentro del mismo se ha dispuesto un molinete con cuatro aspas extremadamente delgadas, de aluminio o mica, pulidas por una de sus caras y ennegrecidas por la otra. Al incidir sobre el radiómetro la energía radiante procedente del sol, de una lámpara de arco o de una lámpara de incandescencia, la superficie ennegrecida de las aspas la absorbe, aumentando su temperatura, mientras que las superficies brillantes reflejan la radiación y permanecen frías. Las moléculas del aire residual que se ha dejado en el globo, al dirigirse hacia las superficies negras, son rechazadas con fuerza considerable. Las que se encuentran próximas a las caras brillantes, apenas sufren este efecto. Por lo tanto, las moléculas que rebotan proporcionan impulsos más fuertes a las superficies ennegrecidas que a las brillantes (según el

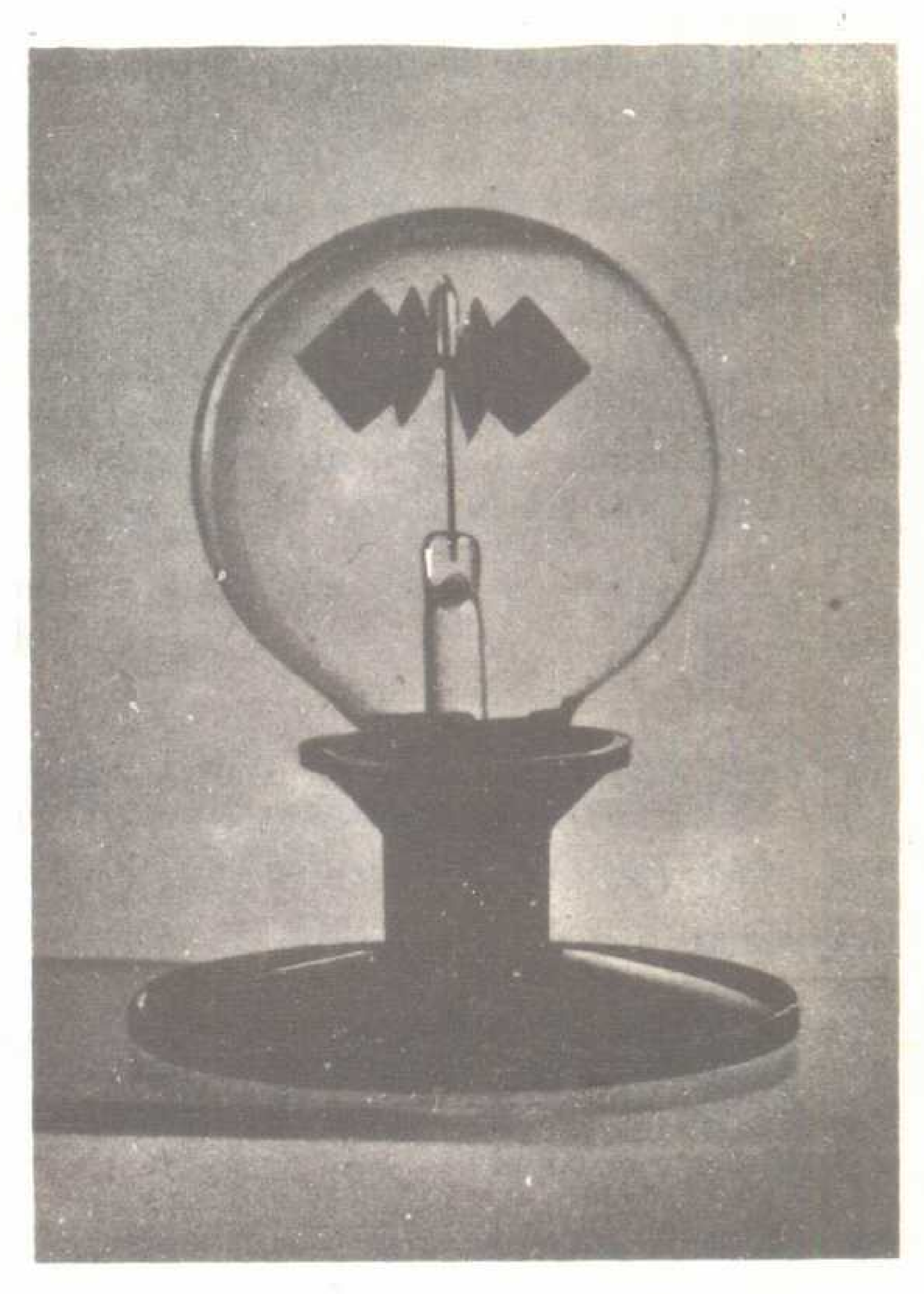


Fig. 3-20. Radiómetro de Crookes.

principio de acción y reacción). Resultado de ésto es que el molinete del radiómetro adquiere movimiento giratorio, ejerciendo aparentemente empuje la radiación sobre las superficies negras. La velocidad angular del molinete es aproximadamente proporcional a la intensidad de la energía radiante que incide sobre el instrumento.

Entre otros dispositivos capaces de poner de manifiesto la radiación, se encuentran las *pilas termoeléctricas* (grupo de termoelementos que transforman directamente el calor en energía eléctrica), el *bolómetro* (dispositivo que utiliza la variación de resistencia eléctrica de una cinta de platina ennegrecida, expuesta a la radiación) y el *termistor,* (utilizado como el bolómetro, pero constituido por semiconductores). Se utilizan también en gran escala las *fotocélulas* (sulfuro de cadmio para al luz visible y sulfuro de plomo, seleniuro de plomo y telururo de plomo, más sensibles a la radiación infrarroja). Es posible sensibilizar película fotográfica de modo que pueda impresionarse en condiciones de obscuridad (óptica) total. En otro lugar de esta obra, se encontrarán más detalles acerca de materiales sensibles a estas radiaciones.

8 CALOR SOLAR

El sol irradia calor a la tierra en proporción estimada en 1,94 cal/cm^2/min. La superficie total de la tierra recibe aproximadamente $1{,}5 \times 10^{17}$ Kcal por hora. Así, en el transcurso de 45 horas de radiación ininterrumpida, la energía que recibimos del sol equivale a la contenida en las reservas totales disponibles de carbón, petróleo y gas natural (casi 7×10^{18} Kcal). Por desgracia, la energía del sol no puede siempre utilizarse eficazmente, puesto que para aprovecharla industrialmente haría falta una gran superficie de captación.

Donde las condiciones son favorables (Japón, India, Francia meridional, el Sahara, Negueb, Arizona y California), se han instalado grandes reflectores cóncavos para concentrar en el foco el flujo radiante del sol. En la India, instalaciones experimentales de esta clase funcionan aproximadamente 285 días por año. En el Japón, se pueden hervir unos 5 litros de agua en poco más de 40 minutos mediante calderas solares y cocinar por el mismo procedimiento 1¼ kg de arroz en una hora. Mediante hornos solares se han alcanzado recientemente elevadas temperaturas, por ejemplo 3.500°C en el caso de un horno experimental en Arizona. Un espejo de 9,15 m en Mont Louis, Francia, produce una temperatura también de 3.500°C en el foco (el punto de fusión del hierro es de 1.540°). Se espera utilizar en mayor escala la energía solar para compensar la disminución de las reservas de combustibles comunes. Hacia el año 2 060, el sol podría suministrar el 40 % de la energía total necesaria, quedando el resto a cargo de las reacciones nucleares.

REPASO

Preguntas

1 Explíquese por qué un vaso de paredes gruesas está expuesto a romperse vertiendo en el mismo agua hirviente. ¿Cómo puede impedirlo poner dentro una cuchara metálica?

2 ¿Por qué una escalera de incendio de hierro se encuentra más fría al tacto, en invierno, que la solera de cemento de la ventana?

3 ¿Por qué un pájaro esponja sus plumas en tiempo muy frío?

4 ¿Por qué conviene descongelar el refrigerador cuando el serpentín se cubre de una gruesa capa de hielo?

5 ¿Por qué el aserrín es peor conductor del calor que la madera de que proviene?

6 Con cuidado, puede hacerse hervir agua en un recipiente de papel. Explíquese por qué.

7 ¿Por qué una chimenea alta tiene mayor tiraje que otra de poca altura?

8 ¿Por qué se debe colocar el hielo en la parte superior de los refrigeradores que no son mecánicos?

9 Explíquese, mediante dos diagramas, el significado de las expresiones *brisa terrestre* y *brisa marítima*.

10 En la fig. 3-4 (experimento para demostrar que el agua es mala conductora del calor), ¿qué podría objetarse si se colocara el calentador en el fondo del recipiente?

11 Dibújense las corrientes de convección que se establecen al poner un cubo de hielo en un jarro de limonada.

12 Explíquese por qué la nieve sucia funde antes que si estuviera limpia.

13 Para impedir que se hielen los frutos cítricos, los productores de California recurren a hogueras que desprenden mucho humo. ¿Por qué impide el humo que los frutos se hielen?

14 Se calientan a una misma temperatura superior a la ambiente, dos pedazos iguales, de plata y grafito respectivamente. ¿Cuál de ellos se enfriará más rápidamente y por qué?

15 Nos sirven una taza de café caliente al principio de la comida, en lugar del final, como hubiésemos preferido. Para que se conserve caliente tanto como sea posible, convendrá añadirle crema inmediatamente, ¿o no? (Téngase en cuenta la ley de enfriamiento de Stefan-Boltzmann).

16 La glándula llamada *hipotálamo* estrecha las venas que llevan la sangre a nuestras extremidades. Cuando esto ocurre en tiempo muy frío, ¿por qué disminuye la cantidad de calor perdido por radiación?

17 Hágase un breve estudio y descripción de las células solares de que está provisto el satélite "Telstar" para proporcionar energía eléctrica a su equipo de comunicaciones.

Problemas

1 ¿Cómo debería transformarse la ecuación (3-1) para que expresara Q o cantidad total de calor, en lugar de H que representa flujo calorífico?

2 Supongamos que a través de una lámina metálica de 25 cm^2 de superficie pasa un flujo calorífico de 1.000 cal/seg. Manteniendo invariables los demás factores, ¿cómo variará el flujo aumentando al doble la superficie? ¿Y disminuyéndola a la mitad?

3 Aumentando al doble el espesor de la lámina del Problema 2, manteniendo invariables los demás factores, ¿cómo variará el flujo calorífico que la atraviesa?

4 Llevando al doble la superficie, el espesor y la diferencia de temperaturas entre las caras de una lámina metálica, ¿cómo se modificará el flujo calorífico que la atraviesa?

5 La conductibilidad calorífica específica del vidrio es de 0,0025 cal/seg/cm^2/C° /cm/. Calcular la cantidad de calor que pasará en 5 horas a través de una superficie de vidrio de 10 m^2 y 0,4 cm de espesor existiendo una diferencia de temperatura de 20°C entre las dos caras.

CAMBIOS DE ESTADO

4

1 PRINCIPIOS GENERALES

Estudiaremos en este capítulo el cambio de un estado físico o fase a otro. A cada estado de la materia corresponden condiciones determinadas de temperatura y presión, que dependen de su estructura o configuración particular necesitándose añadir o substraer calor para permitir el paso de un estado a otro. La fig. 4-1 resume los términos utilizados para designar los diferentes cambios de fase.

Recordemos que un sólido verdadero o cristalino es un conjunto de átomos unidos entre sí en forma regular y periódica. Para licuar al sólido (suponiendo que se encontraba previamente a temperatura inferior al punto de fusión) debe en primer lugar comunicársele suficiente energía calorífica para aumen-

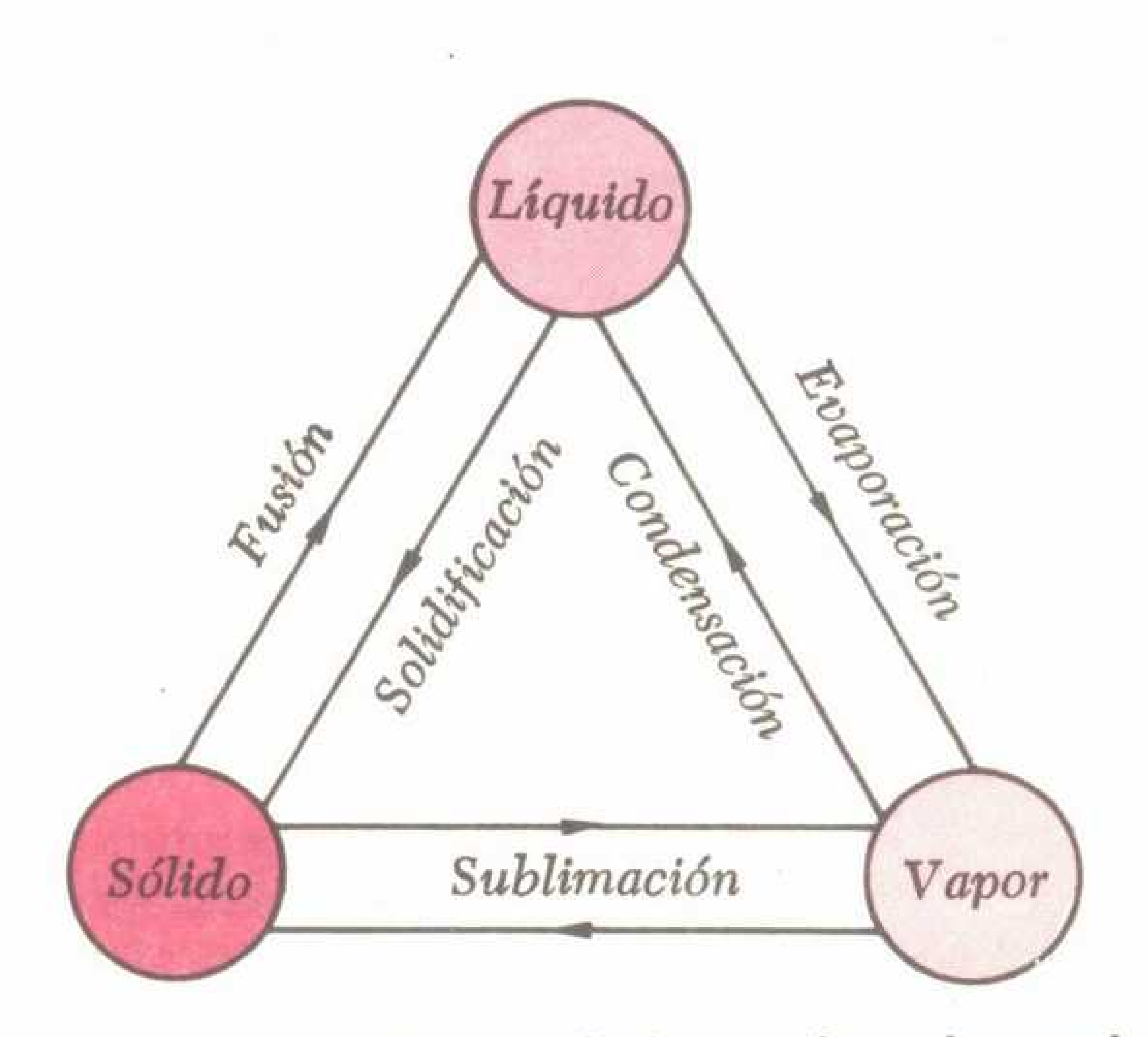


Fig. 4-1. Nomenclatura de los cambios de estado.

tar la agitación térmica de su red cristalina y llevarlo por lo tanto a la temperatura correspondiente al punto de fusión. Luego, debe añadirse calor suficiente para debilitar y romper la estructura cristalina, o sea fundir el sólido. La primera porción de calor sirve para aumentar la energía cinética de los átomos, necesitándose la segunda para superar las fuerzas de unión que los mantenían unidos y darles mayor grado de libertad aumentando en consecuencia su *energía potencial.* La temperatura se eleva uniformemente durante el calentamiento preliminar; se mantiene luego invariable mientras el sólido funde. *La fusión de un sólido cristalino es, por lo tanto, un proceso de absorción de calor a temperatura constante.* En el caso de sólidos *amorfos* (no cristalinos) tiene lugar un reblandecimiento progresivo del cuerpo, de aquí que no tengan punto de fusión fijo (temperatura constante). Pero también debe comunicárseles calor externo para producir el cambio de estado propuesto.

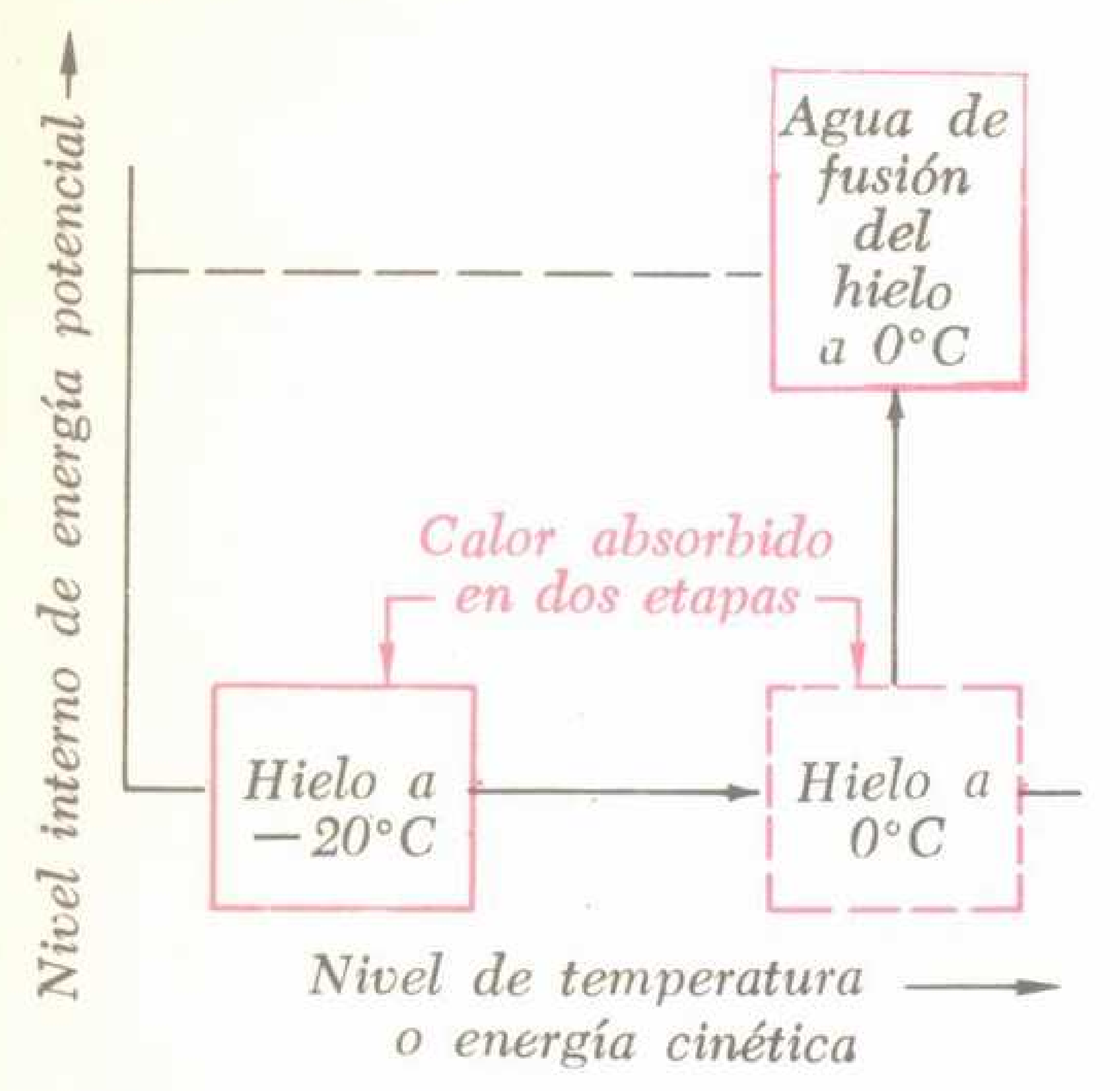


Fig. 4-2. Variaciones de energía que acompañan el calentamiento y fusión del hielo.

En la fig. 4-2 se representa gráficamente la fusión del hielo, encontrándose previamente a temperatura inferior a su punto de fusión normal. Las ordenadas representan niveles de energía potencial interna, mientras que el eje horizontal corresponde a niveles de energía cinética (temperatura). Obsérvese que la suma de los dos es la *energía interna* total del sólido al que se suministra calor.

Invertimos el proceso de fusión cuando enfriamos un líquido a temperatura ambiente hasta su punto de congelación, solidificándose luego. El líquido debe ceder ahora energía calorífica a los cuerpos que lo rodean, parte de ella debido a la disminución de energía cinética potencial. Al revés de la fusión, el proceso de congelación *cede calor* puesto que representa la vuelta a un nivel inferior de energía potencial. *Pero como anteriormente, el cambio de estado tiene lugar a temperatura constante.*

La fig. 4-3 representa en forma esquemática las variaciones de energía interna que tienen lugar cuando se enfría agua a temperatura ambiente hasta 0°C, congelándose luego. Obsérvese atentamente el sentido de la flecha representativa del suministro de calor, tanto en éste como en el diagrama anterior.

Consideraciones análogas se aplican a la vaporización de un líquido y al fenómeno inverso, o sea la condensación de un vapor o liquefacción de un gas. Para alcanzar el estado gaseoso, es preciso que al líquido, a temperatura ambiente, se le suministre primero energía calorífica suficiente para aumentar su energía exclusivamente térmica o cinética. Con esto se llevará al líquido a su punto de ebullición. Una vez alcanzado este punto, la fuente

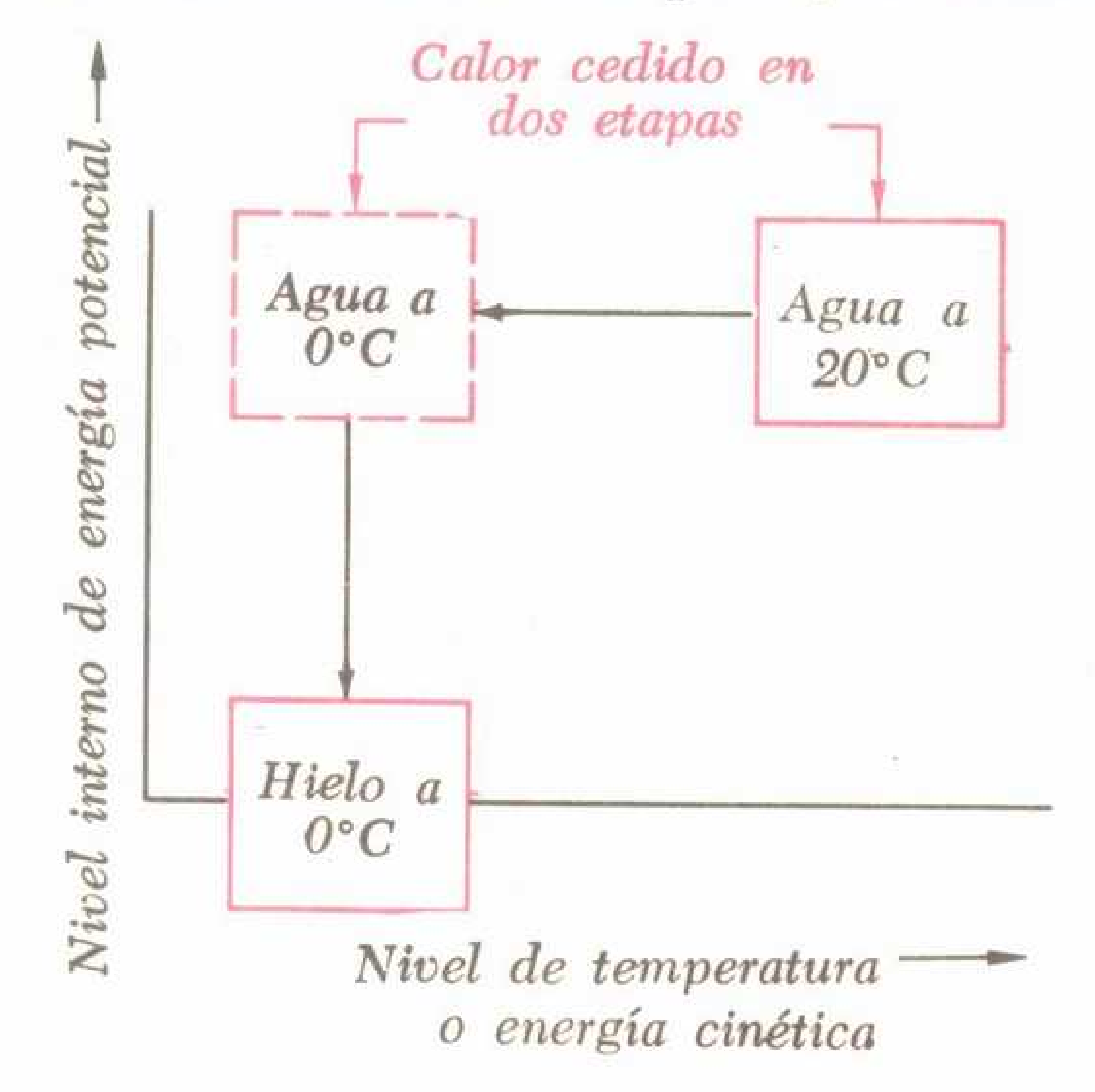


Fig. 4-3. Variaciones de energía que acompañan el enfriamiento y solidificación del agua.

externa de calor debe seguir suministrándole considerable cantidad del mismo para anular todo vestigio de cohesión molecular, permitiendo que el líquido pase al estado de "máximo desorden" que conocemos como estado gaseoso. La vaporización, por lo tanto, es un proceso que *absorbe calor* e inversamente, la condensación de un vapor *cede calor*. En el primer caso, se lleva a cabo un aumento de energía potencial; en el segundo, una disminución y el calor previamente suministrado vuelve a los cuerpos que rodean al vapor que se condensa.

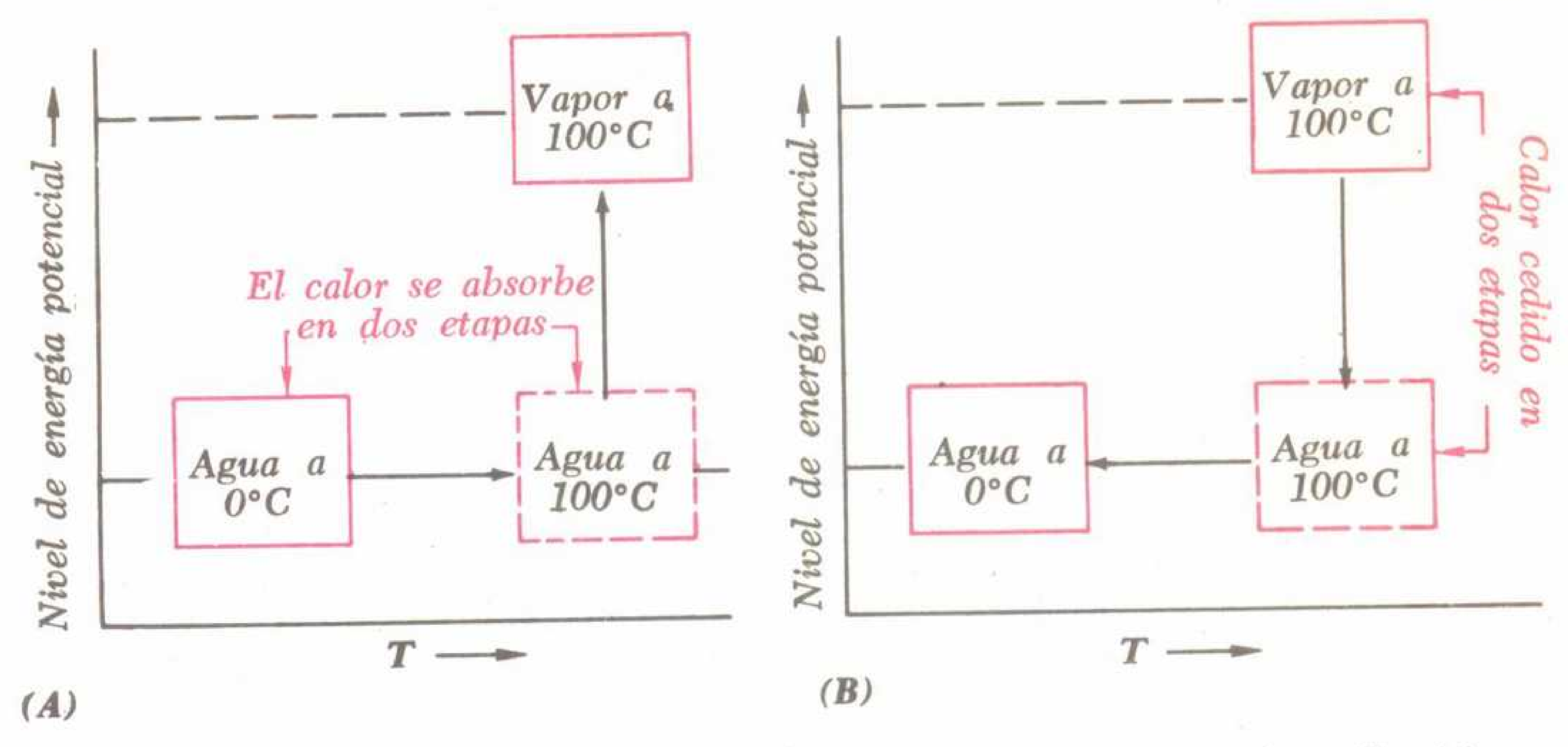


Fig. 4-4. Variaciones de calor que acompañan la ebullicción del agua y condensación del vapor.

Las figs. 4-4 (A) y (B) esquematizan los hechos que acabamos de analizar. Como en los diagramas precedentes, no se ha tenido en cuenta, en sentido cuantitativo, el calor suministrado o cedido en el proceso. Estudiaremos este aspecto con cierto detalle al final del capítulo.

2 PUNTOS DE TRANSICION: ANALISIS GRAFICO

La fig. 4-5 representa el gráfico de temperatura con respecto al calor para una determinada masa de hielo a −20°C que se transforma en vapor a 120°C. Se supone que el hielo está exento de impurezas y la fusión y ebullición tienen lugar a la presión atmosférica normal. El calor se suministra en forma aproximadamente constante. Pueden observarse los siguientes detalles:

1. La porción *AB* del gráfico indica un *aumento constante* de temperatura mientras el hielo pasa desde su temperatura inicial, inferior a 0°C, hasta la temperatura de fusión (0°C).
2. La porción *BC* se caracteriza por su *temperatura constante* de 0°C. Es la fase de fusión, durante la cual se mantiene invariable la lectura del termómetro. Todo el calor suministrado durante este intervalo sirve para debilitar la estructura cristalina del hielo y aumentar su energía potencial interna. Las moléculas del hielo adquieren mayor libertad, pero no varía su velocidad media.
3. La parte *CD* del gráfico presenta otra *elevación* de temperatura. El calor añadido se emplea para aumentar la componente cinética de la energía interna total del agua.

Sus moléculas vibran más enérgicamente a medida que la temperatura se aproxima al punto de ebullición.

4. En el punto de ebullición, *D*, se detiene de nuevo la elevación de la coloumna termométrica, *manteniéndose constante* a 100°C la temperatura durante la fase de ebullición. El calor suministrado durante el intervalo *DE* se emplea en vencer las últimas trazas de cohesión molecular.

5. La parte *EF* del gráfico muestra otro *aumento* de temperatura, al pasar el vapor desde 100°C hasta 120°C (vapor *recalentado*).

Ya hemos dicho que los sólidos cristalinos en estado de pureza, al fundir a presión determinada, sufren un derrumbamiento brusco de su estructura y se caracterizan por lo tanto por tener *punto de*

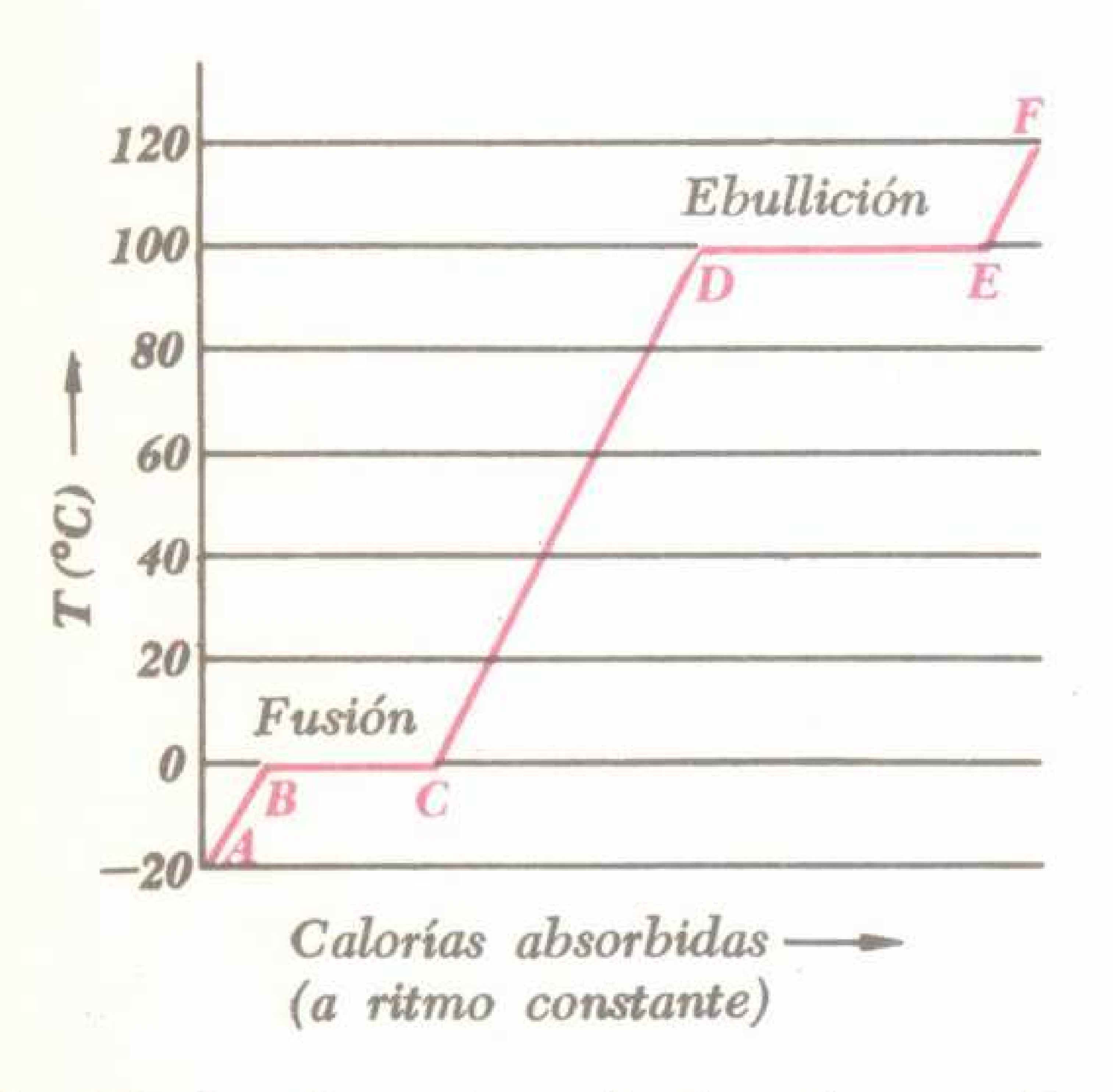


Fig. 4-5. Transformaciones de fase desde el hielo hasta el vapor y sus correspondientes temperaturas.

fusión definido. (Por el contrario, los sólidos plásticos o amorfos pasan gradualmente al estado líquido, en forma casi imperceptible). El hielo funde a 0°C, el galio a una temperatura ligeramente inferior a la del cuerpo humano, el plomo a 327°C, la plata a 961°C y el tungsteno a 3.370°C. El punto de fusión del mercurio sólido es de −39°C, el del oxígeno sólido de −218°C. *Los puntos de fusión y de solidificación son idénticos*. Por lo tanto, nos referimos indistintamente a la temperatura de 0°C como punto de fusión del hielo o de solidificación del agua. A esta temperatura, el hielo y el agua se encuentran en equilibrio mutuo (existen ambos a la vez). Suministrando calor a la mezcla agua-hielo, más cantidad de hielo pasa al estado líquido; la absorción de calor invierte el proceso.

Análogamente, los líquidos químicamente puros tienen, a la presión atmosférica normal, *punto de ebullición definido*. El agua hierve a 100°C, el éter a 34,6°C, el aire líquido a −193°C, el estaño fundido a 2.270°C. Veremos más adelante cómo la presencia de impurezas y las variaciones de presión influyen sobre los puntos de fusión y de ebullición. Mientras tanto, recordemos que en condiciones determinadas de pureza y presión, los puntos de transición a que nos hemos referido tienen valor *fijo* y pueden utilizarse, en consecuencia, para la calibración de las escalas termométricas, tal como estudiamos en el Capítulo 1.

3 FUSION Y CALOR DE FUSION

Definimos al *calor de fusión* como *la cantidad de calor que debe comunicarse a la unidad de masa de un sólido a la temperatura de fusión para transformarlo totalmente en líquido a la misma temperatura*. El calor de fusión se representa por el símbolo L_f y se relaciona con Q (calor suministrado) y m (masa del cuerpo que experimenta la fusión) mediante la expresión

$$L_f = \frac{Q}{m} \qquad (4\text{-}1)$$

Por lo tanto, L_f puede expresarse en *calorías por gramo* o *unidades térmicas inglesas por libra*. Su valor aproximado pa-

ra el hielo es de 80 cal/g o bien 144 Btu/libra. Para fundir 10 g de hielo a 0°C se necesitarán 10 × 80 = 800 cal ($Q = L_f \times m$). Análogamente, para fundir 5 libras de hielo a 32°F se necesitarán 5 × 144 = 720 unidades térmicas inglesas.

o bien

$$8.575 = 100\,L_f + 580$$

y despejando la incógnita,

$$L_f = 80 \text{ cal/g (aproximadamente)}$$

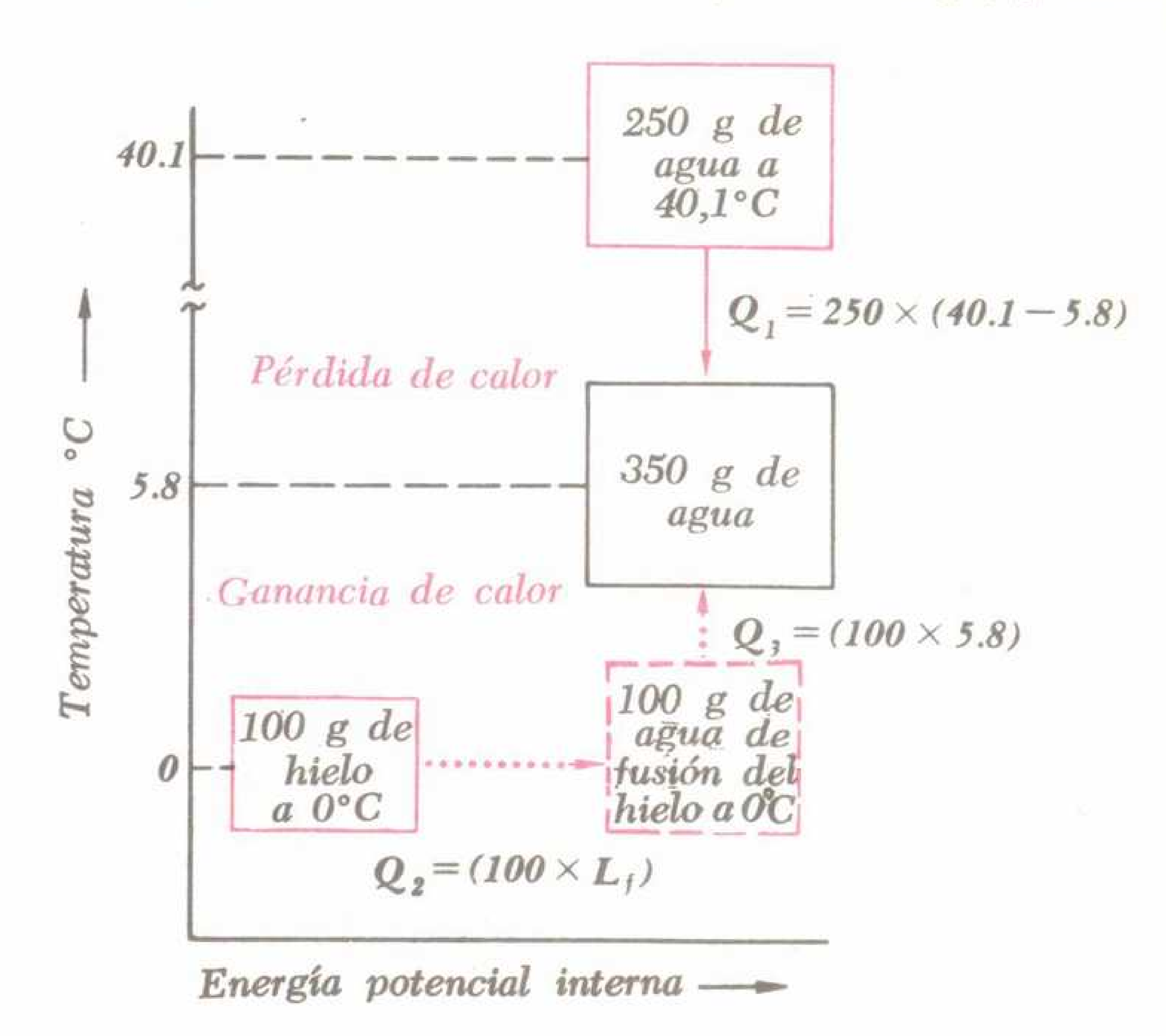


Fig. 4-6. Diagrama de un intercambio de calor comprendiendo hielo y agua caliente.

Otros valores de calor de fusión, son 5,47 cal/g para el plomo, 26 cal°g para la plata y 14 cal/g para el estaño. Vamos a estudiar cómo se puede determinar en el laboratorio el calor de fusión del hielo. Supongamos que se añaden 100 g de hielo a 0°C a 250 g de agua a 40,1°C. Midiendo la temperatura del líquido obtenido después de la fusión total del hielo, se comprueba que es de 5,8°C. En el diagrama de la fig. 4-6 se ve que al pasar de 40,1°C a la temperatura final de 5,8°C, el agua caliente ha cedido 250 × (40,1 − 5,8) = 8.575 cal. Este calor se ha invertido en (1) fundir 100 g de hielo a 0°C y (2) elevar la temperatura de 100 g de agua a 0°C obtenidos por fusión del hielo hasta 5,8°C. Lo cual puede expresarse mediante la ecuación

$$8.575 = (100 \times L_f) + (100 \times 5{,}8)$$

Invirtamos ahora el cálculo anterior y tomando para el hielo $L_f = 80$ cal/g, vamos a calcular la temperatura de la mezcla obtenida al unir agua caliente y hielo.

• **Problema 1.** Se añaden 30 g de hielo a 0°C a 500 g de agua a 60°C. ¿Cuál es la temperatura (T) de la mezcla?

Solución. Supongamos que una vez fundido todo el hielo, el agua ha alcanzado la temperatura T°C. El calor cedido por el agua caliente, 500 × (60 − T) cal, se emplea en fundir el hielo, 30 × 80 cal y elevar la temperatura de 30 g de agua proveniente de la fusión del hielo desde 0°C hasta T°C, o sea 30 × T cal. Por lo tanto,

$$500\,(60 - T) = (30 \times 80) + 30\,T$$

Resolviendo esta ecuación, tenemos

$$T = 52,1°C.$$

Obsérvese en la fig. 4-7 el balance térmico mediante el cual se analiza la solución del problema anterior.

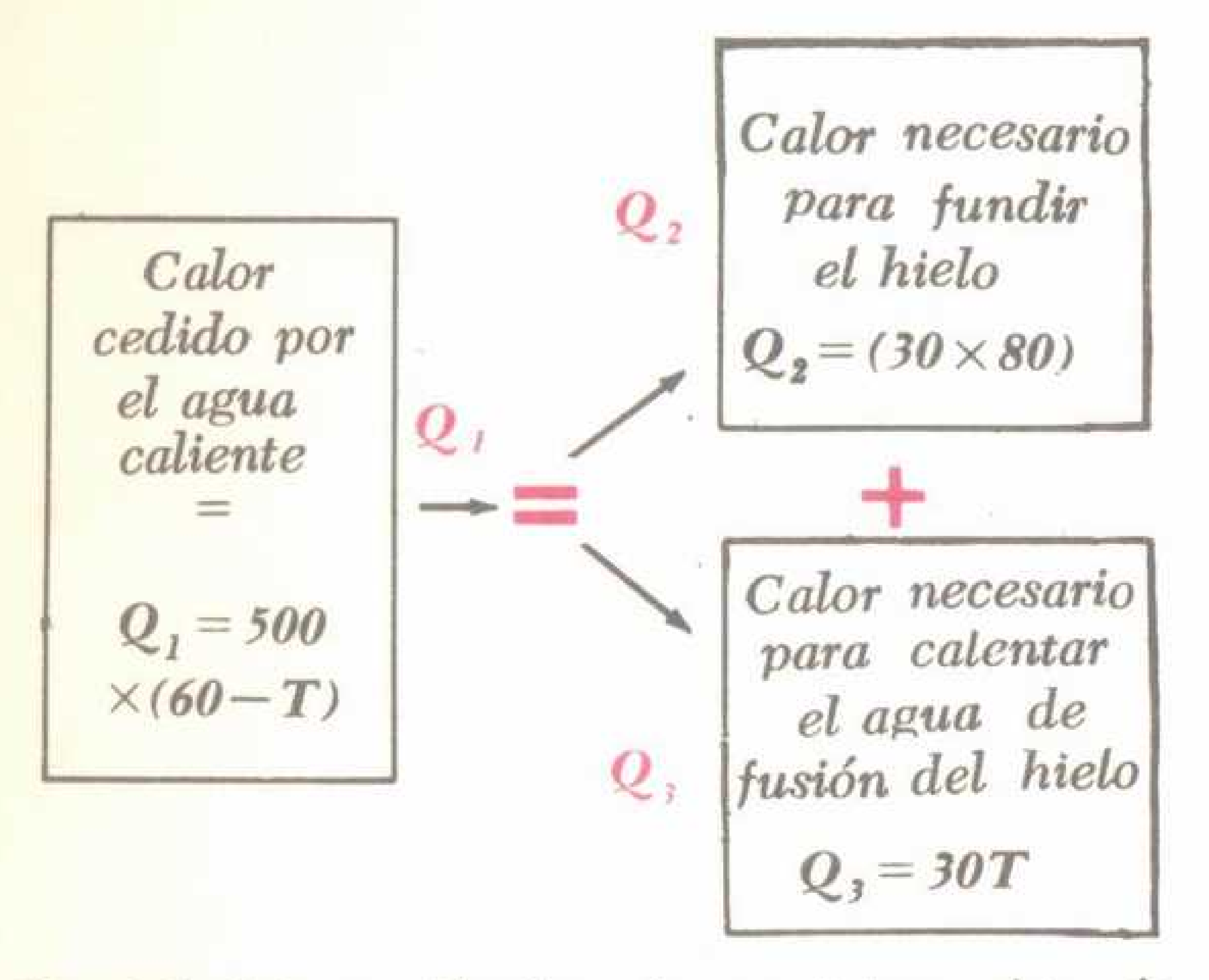


Fig. 4.7 Balance térmico de un intercambio de calor que comprende un cambio de estado ($Q_1 = Q_2 + Q_3$). T representa la temperatura de la mezcla.

4 INFLUENCIA DE LA PRESION SOBRE EL PUNTO DE FUSION: REHIELO

Podría parecer que el punto de fusión del hielo o solidificación del agua, es invariablemente igual a 0°C. En realidad, es verdad solamente si la presión atmosférica se mantiene a su valor normal (1 kg/cm^2, aproximadamente). El aumento de la presión hace *descender* el punto de fusión de los cuerpos que se *dilatan* al solidificarse (agua, antimonio, bismuto, metal de imprenta, hierro fundido) y *aumentar* el de los que se *contraen* al solidificarse (la mayoría de los demás). Este efecto es perceptible solamente mediante presiones muy altas. Por ejemplo, se necesita la enorme presión de 110 atmósferas para disminuir en 1°C el punto de fusión del hielo.

Para comprender esto, fijémonos en las variaciones de *volumen* que tienen lugar en la fusión y en la solidificación. El agua, por ejemplo, aumenta su volumen al transformarse en hielo, lo que se evidencia por la rotura eventual de cañerías de agua en el invierno y el estallido de una esfera metálica llena de agua al congelarse (fig. 4-8). Ejerciendo presión sobre agua a la temperatura de solidificación, se actúa en sentido inverso a la dilatación y en consecuencia se retarda el proceso, hasta alcanzar una temperatura más baja. Por el contrario, en el caso de cuerpos que se contraen al solidificarse, el aumento de presión anticipa el cambio de fase, teniendo lugar la fusión a temperatura más elevada.

El efecto de la presión sobre el punto de fusión del hielo encuentra una aplicación interesante en el clásico experimento de Faraday, en el que tiene lugar el fenómeno llamado *rehielo*. En la fig. 4-9 se representa una barra de hielo apoyada en sus extremos, en la que se ha puesto un alambre delgado con dos grandes pesos, que ejerce considerable presión sobre el hielo. Al cabo de una media hora, el alambre habrá atravesado el hielo, *sin haber separado la barra en dos porciones*. La presión ejercida por el alambre hace descender el punto de fusión del hielo, que al encontrarse a temperatura superior a su



Fig. 4-8. Fuerza ejercida por el agua al congelarse.

punto normal de fusión, se licúa. En cuanto el agua proveniente de la fusión llega a una región donde la presión es normal, vuelve a congelarse, puesto que se encuentra *por debajo* de su punto de solidificación normal. El calor latente de fusión pasa a través del alambre, por conducción, ayudando a fundir hielo y continuar el proceso iniciado.

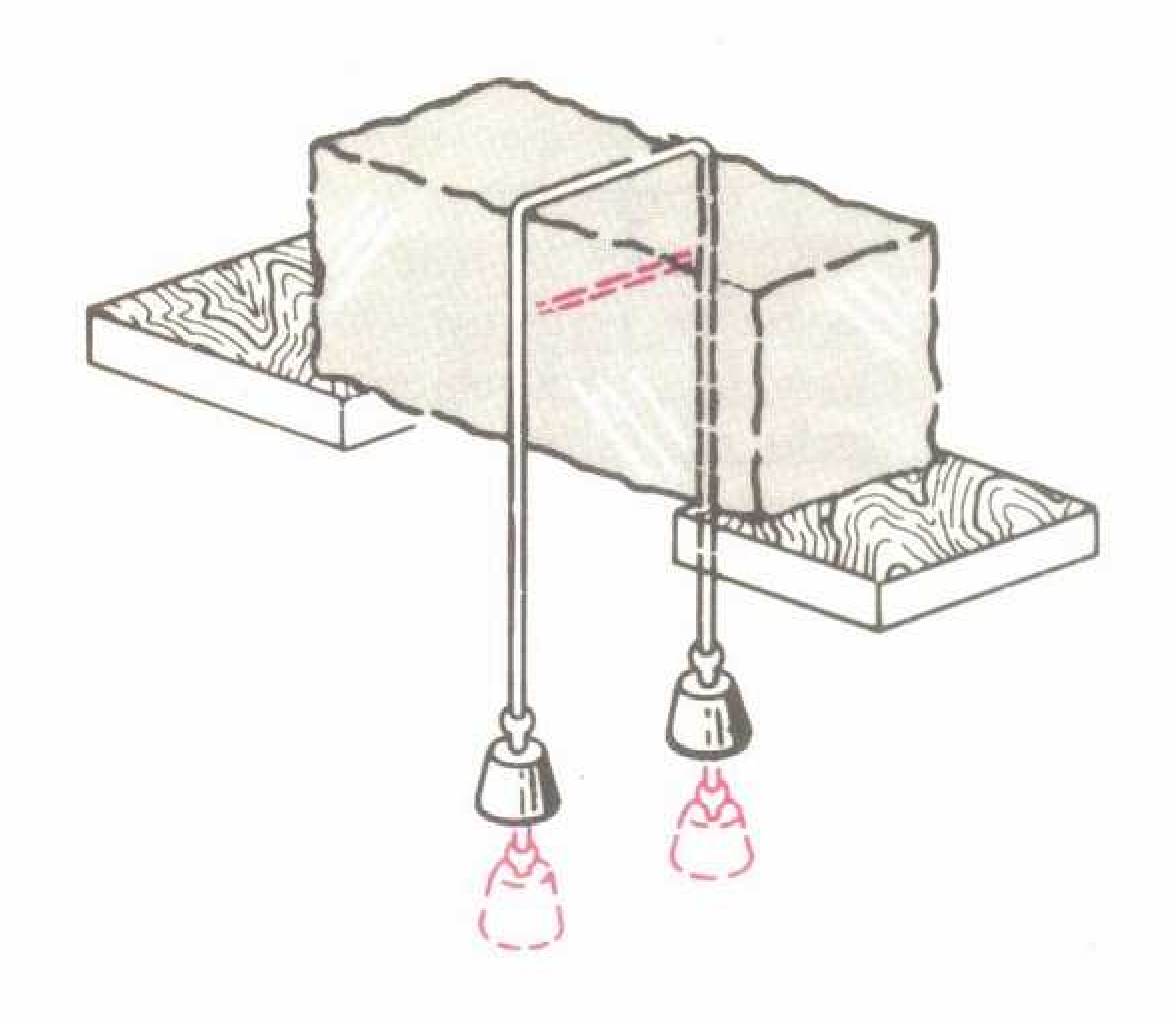


Fig. 4-9. Experimento basado en el **rehielo.**

Ejemplos de rehielo se encuentran en la vida diaria. Es fácil comprimir una masa de nieve hasta transformarla en una consistente bola de nieve. Patinar sobre hielo se basa también en el fenómeno antes descrito. La presión del patín funde el hielo bajo el mismo, produciendo una delgada capa de agua que actúa como lubricante. El agua vuelve a congelarse después. El movimiento de los glaciares obedece al mismo motivo.

5 PUNTO DE SOLIDIFICACION E IMPUREZAS DISUELTAS

El agua, sin aire ni otras impurezas en disolución, puede enfriarse con cuidado por debajo de su punto normal de solidificación, presentando el fenómeno denominado *sobreenfriamiento* (fig. 4-10). Al trasvasarla, o agitarla enérgicamente, se congela súbitamente. Por eso, las cañerías de agua caliente, que conducen agua de la cual se ha eliminado previamente el aire y otras impurezas disueltas, son más proclives a sobreenfriarse y romperse (en el rehielo) que las de agua fría.

El punto de solidificación de la mayoría de líquidos disminuye al añadirles cuerpos extraños. En los países muy fríos, se añade alcohol o glicerina (anticongelantes) al agua del radiador de los automóviles para impedir que se hiele.

Una mezcla frigorífica empleada para helar crema se obtiene añadiendo una parte de sal común a tres partes de hielo triturado. El hielo que funde, disuelve la sal (el punto de solidificación de una solución concentrada de sal en agua, es de unos −20°C) y substrae su calor de fusión de la disolución formada hasta que la temperatura de ésta baja a 0°C. Pero el hielo y la disolución no pueden estar en equilibrio a 0°C, por lo que el hielo continúa fundiendo. El calor necesario para

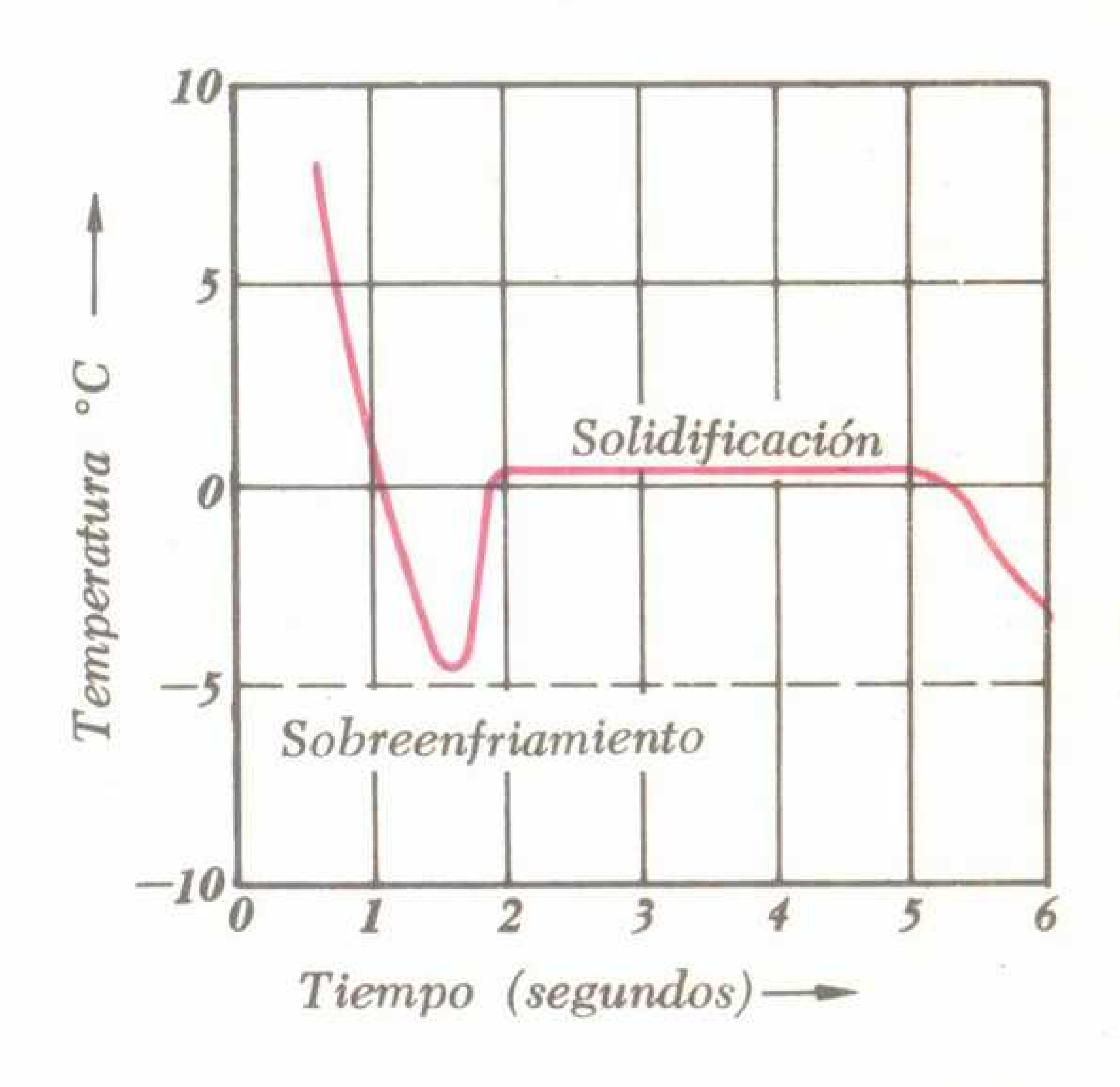


Fig. 4-10. Sobre-enfriamiento del agua.

la fusión, lo suministra el mismo hielo y también la disolución, enfriándose la mezcla hasta alcanzar la temperatura de equilibrio de −20°C. Si no se cediera calor exterior, la mezcla permanecería a esta temperatura. Pero utilizándola para helar

crema, ésta cede calor a quélla, enfriándose en consecuencia hasta helarse.

6 EVAPORACION: PRESION DE VAPOR

Evaporación es el paso de un cuerpo del estado líquido al gaseoso, lo que tiene lugar en la *superficie* del mismo. Siendo necesario comunicar energía a las moléculas para permitirles desprenderse de la superficie, la evaporación es un proceso que absorbe calor, que se substrae a los cuerpos próximos y al resto del propio líquido que se evapora.

Supongamos que en la campana de la máquina neumática colocamos un plato con agua, extrayéndose la mayor cantidad posible de aire (fig. 4-11). Al principio, la evaporación es enérgica, pudiendo imaginar que las moléculas de agua escapan en todos sentidos de la superficie del líquido, se mueven en todos sentidos y algunas vuelven al agua, condensándose en su superficie. Por lo tanto, se suceden continuamente *evaporación* y *condensación*. Cuando vuelven al líquido tantas moléculas como escapan de él, se alcanza un estado de equilibrio y se dice que el vapor que llena el espacio por encima del líquido, está *saturado*.

Aumentando la temperatura del agua dentro de la campana, se aumenta la energía cinética media de las moléculas que abandonan el agua y la evaporación supera momentáneamente la condensación, alcanzándose un nuevo equilibrio, en el cual la nueva *presión de vapor* (fuerza que éste ejerce por unidad de superficie del recipiente que lo contiene) tiene mayor nivel que antes. Por el contrario, disminuyendo la temperatura del agua en la campana, disminuye la nueva presión del vapor, al haberse equilibrado otra vez la evaporación y la condensación.

Colocando el plato con agua en *cualquier recipiente cerrado*, ya sea que se haya hecho el vacío en el mismo o se mantenga lleno de aire, se alcanza la misma condición de equilibrio formándose de nuevo la atmósfera de vapor saturado. La presencia del aire no se opone a la formación de vapor, puesto que es un cuerpo suficientemente "poroso" y como tal ofrece suficiente espacio a las moléculas del vapor de agua. Por lo tanto, cualquier recipiente cerrado y también una habitación en las mismas condiciones puede permitir la formación de una atmósfera saturada de vapor, si contiene cierta cantidad de agua.

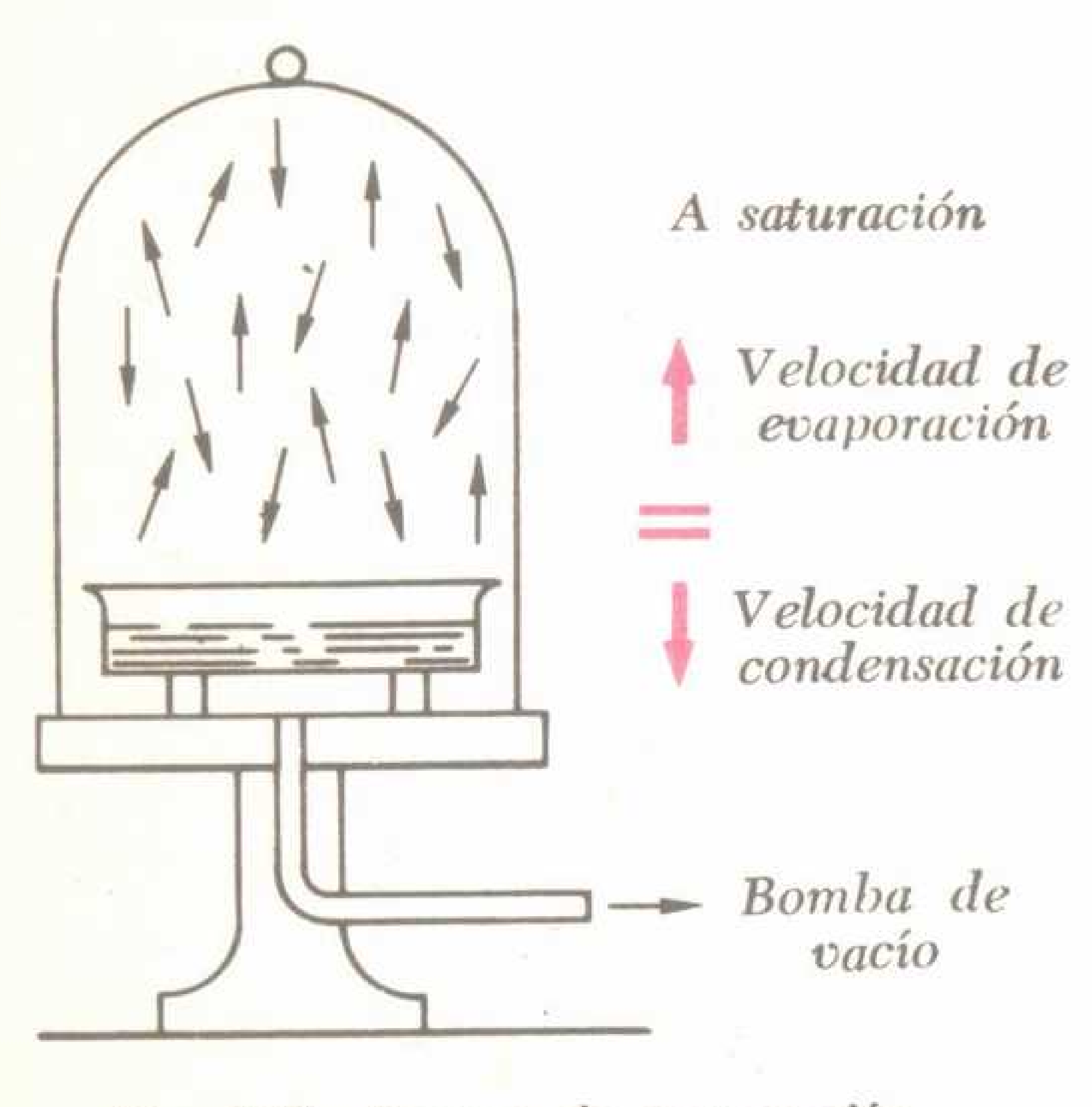


Fig. 4-11. Proceso de evaporación.

Tabla 4-1: PRESION DE VAPOR DEL AGUA

T (°C)	Presión de vapor mm de mercurio	kg/cm²
0	4,58	0,0062
5	6,51	0,0088
10	8,94	0,0121
15	12,67	0,0172
20	17,5	0,0238
40	55,1	0,0749
60	149	0,2026
80	355	0,4828
100	760	1,033
120	1.490	2,026
140	2.710	3,685
160	4.630	6,296
180	7.510	10,213
200	11.650	15,844
220	17.390	23,650

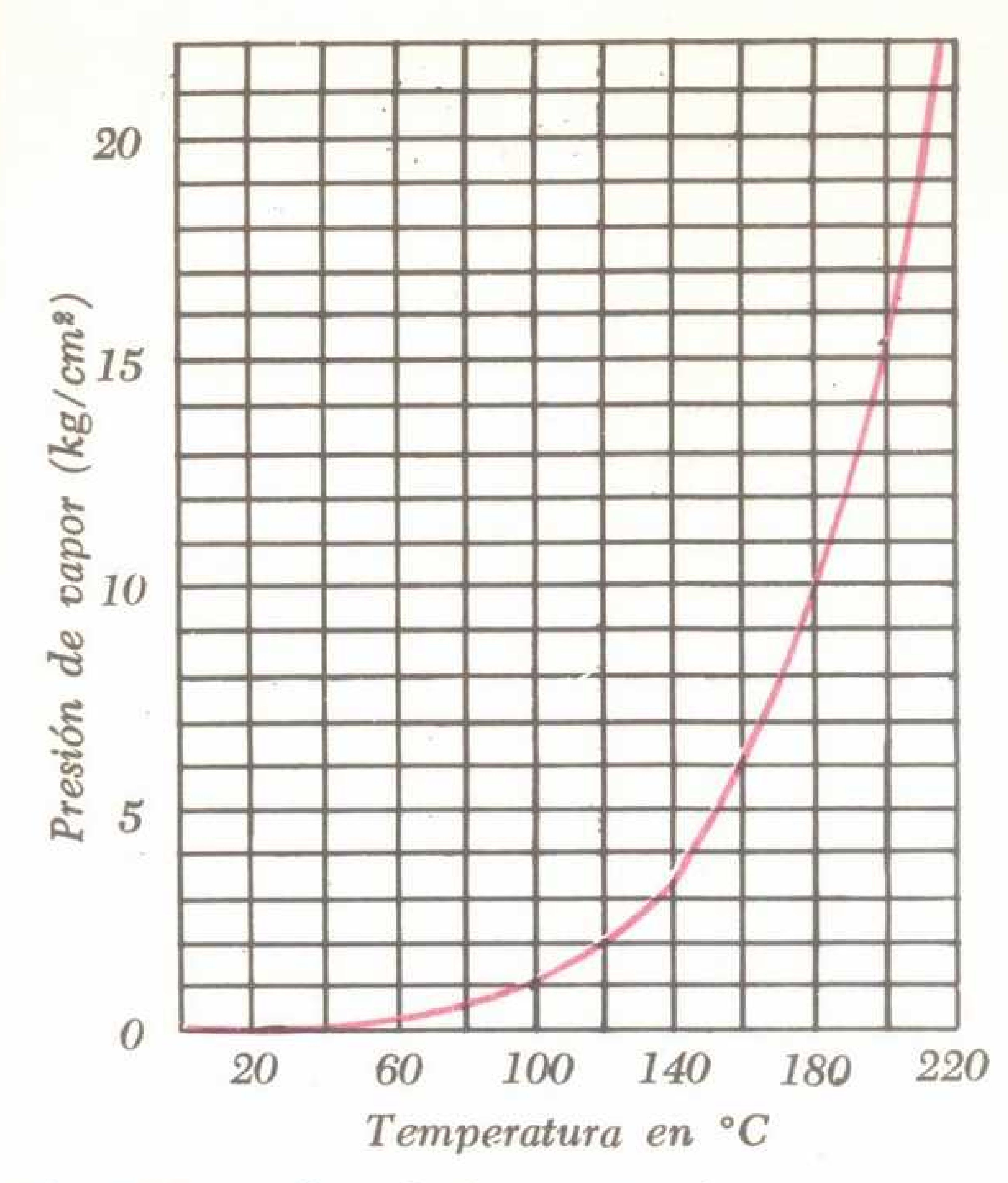


Fig. 4-12. Gráfico de la presión de vapor con respecto a la temperatura, para el agua.

En la Tabla 4-1 se dan los valores de la presión del vapor de agua a diferentes temperaturas. Las presiones están en kilogramos por cm^2 y en mm de mercurio y las temperaturas en grados Celsius. En la fig. 4-12 se ve un gráfico de presiones en kg/cm^2 con respecto a temperaturas en grados C. Obsérvese que a 100°C, la presión del vapor es exactamente la presión atmosférica normal, 1,033 kg/cm^2. Llevando el agua a esta temperatura, el vapor se forma en toda la masa del líquido, diciéndose que *hierve*. Llámese punto de ebullición de un líquido, la *temperatura a la cual la presión del mismo es exactamente igual a la presión exterior.* Dentro de poco tendremos ocasión de referirnos a la tabla y al gráfico, al estudiar la ebullición y la humedad relativa.

7 CALOR DE VAPORIZACION

Llamamos *calor de vaporización* (L_v) *a la cantidad de calor necesaria para convertir completamente en vapor a la temperatura de ebullición del líquido, a la unidad de masa del mismo, previamente a dicha temperatura.* El calor de vaporización, como el de fusión, se expresa en cal/g (y en Btu por libra, en los países de habla inglesa en las mediciones de carácter industrial). Para el agua a 100°C, $L_v = 540$ cal/g que equivalen a 972 Btu por libra. Para hacer hervir, hasta evaporar por completo, 20 g de agua a 100°C, hacen falta $20 \times 540 = 10.800$ cal. Y para condensar totalmente 20 g de vapor de agua a 100°C, hará falta substraer también 10.800 cal. Debido a la fuerte unión entre los hidrógenos del agua, ésta presenta valores excepcionalmente altos para L_f y L_v.

Es interesante hacer notar que el calor de vaporización del agua a la temperatura de 50°C es de 569 cal/g y a 200°C es de 462 cal/g. (El agua puede hervir a estas temperaturas, variando convenientemente la presión exterior.) La razón de esta aparente anomalía se encuentra en el hecho de que a mayor temperatura, es también mayor la energía que poseen las moléculas del líquido, necesitándose menor cantidad de calor para producir la vaporización. A 374°C, *temperatura crítica* del agua, no hace falta suministrarle cantidad alguna de energía para transformarla en vapor. En realidad, a esta tem-

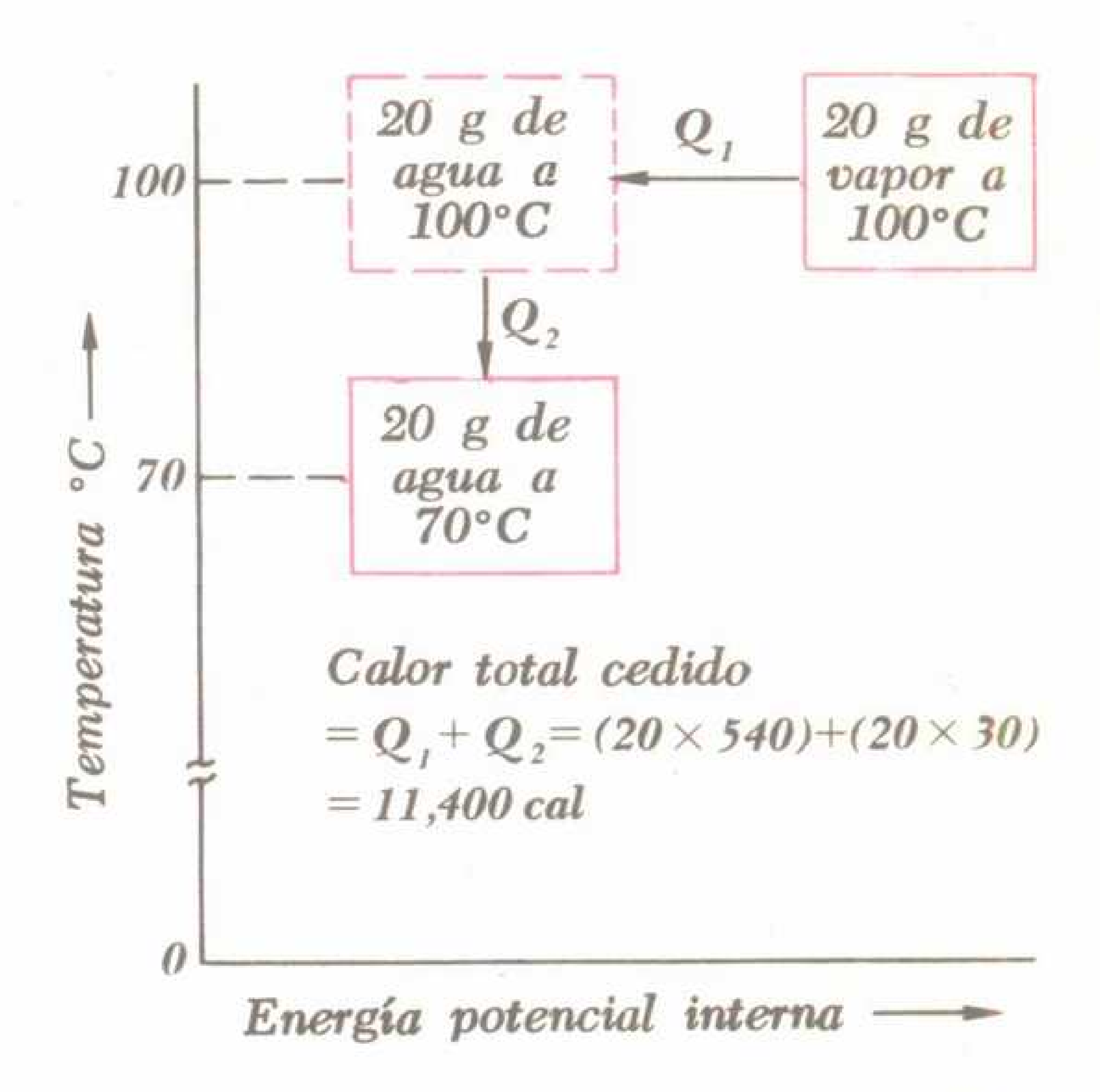


Fig. 4-13. Calor cedido por condensación del vapor y enfriamiento del agua hirviente.

peratura no se hace visible la superficie del agua por falta de tensión superficial (que normalmente da lugar al *menisco*), por lo que no puede distinguirse el agua de vapor.

• **Problema 2.** Se condensan 20 g de vapor de agua a 100°C para formar agua a 70°C. Calcular el calor cedido en este proceso. (Véase la fig. 4-13.)

Solución. El calor se libera en dos etapas diferentes: primero, cuando se condensa el vapor en agua a 100°C y luego, cuando el agua condensada se enfría hasta 70°C. En la primera etapa, se ceden $20 \times 540 = 10.800$ cal; en la segunda, $20 \times (100 - 70) = 600$ cal. El calor total cedido es, por lo tanto, $10.800 + 600 = 11.400$ cal.

• **Problema 3.** Se mezclan 10 g de vapor a 100°C con 300 g de agua a 20°C. Prescindiendo del efecto del recipiente, calcular la temperatura de la mezcla. (Para un estudio gráfico del proceso, véase la fig. 4-14).

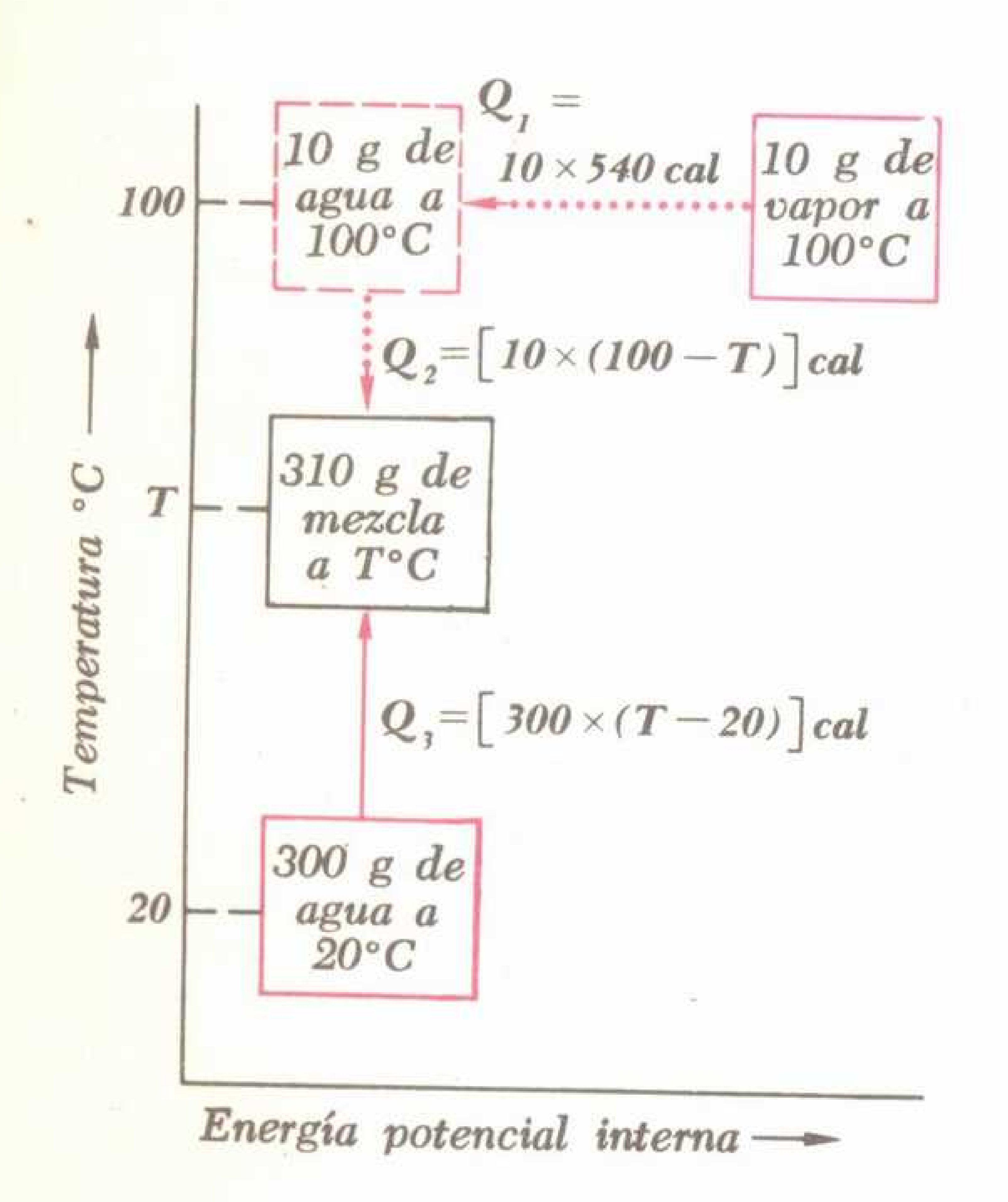


Fig. 4-14. Diagrama de intercambio de calor (cambio de estado) en el que interviene vapor y agua.

Solución. La condensación del vapor cede $10 \times 540 = 5.400$ cal. Para que el líquido condensado adquiera la temperatura T de la mezcla, debe ceder además $10 \times (100 - T)$ cal. El calor absorbido por el agua, inicialmente a 20°C y finalmente a T°C, es igual a $300 \times (T - 20)$ cal. Igualando el calor absorbido y el cedido,

$$5.400 + 10\,(100 - T) = 300\,(T - 20)$$

de donde

$$T = 40°C$$

8 ALGUNAS APLICACIONES DE LOS PRINCIPIOS DEL CAMBIO DE ESTADO

Una fricción de alcohol produce un efecto refrescante momentáneo a un enfermo con fiebre, debido a la evaporación del líquido sobre la piel del paciente. El cuerpo mantiene su temperatura normal (36,5°C) mediante el equilibrio entre la producción de calor y la pérdida del mismo por radiación y evaporación de la humedad de la piel. En verano, se refrescan las calles por evaporación del agua con que se las riega. La *sublimación* del hielo seco (anhídrido carbónico sólido) da lugar a una disminución de temperatura, mientras que una nevada reciente libera calor.

En la fig. 4-15 se ilustra un llamativo experimento que demuestra la absorción de calor durante la evaporación. Se derrama un poco de agua sobre una caja de madera, colocándose encima un vaso que contiene una pequeña cantidad de éter. Se produce la rápida evaporación del mismo, soplando aire a su través. Después de haberse volatilizado el éter, se invierte la caja, observándose que el vaso queda ad-

herido por el hielo formado. Investigue el lector, como ejercicio, a qué cuerpo se suministraba calor y cuál lo cedía en el ex-

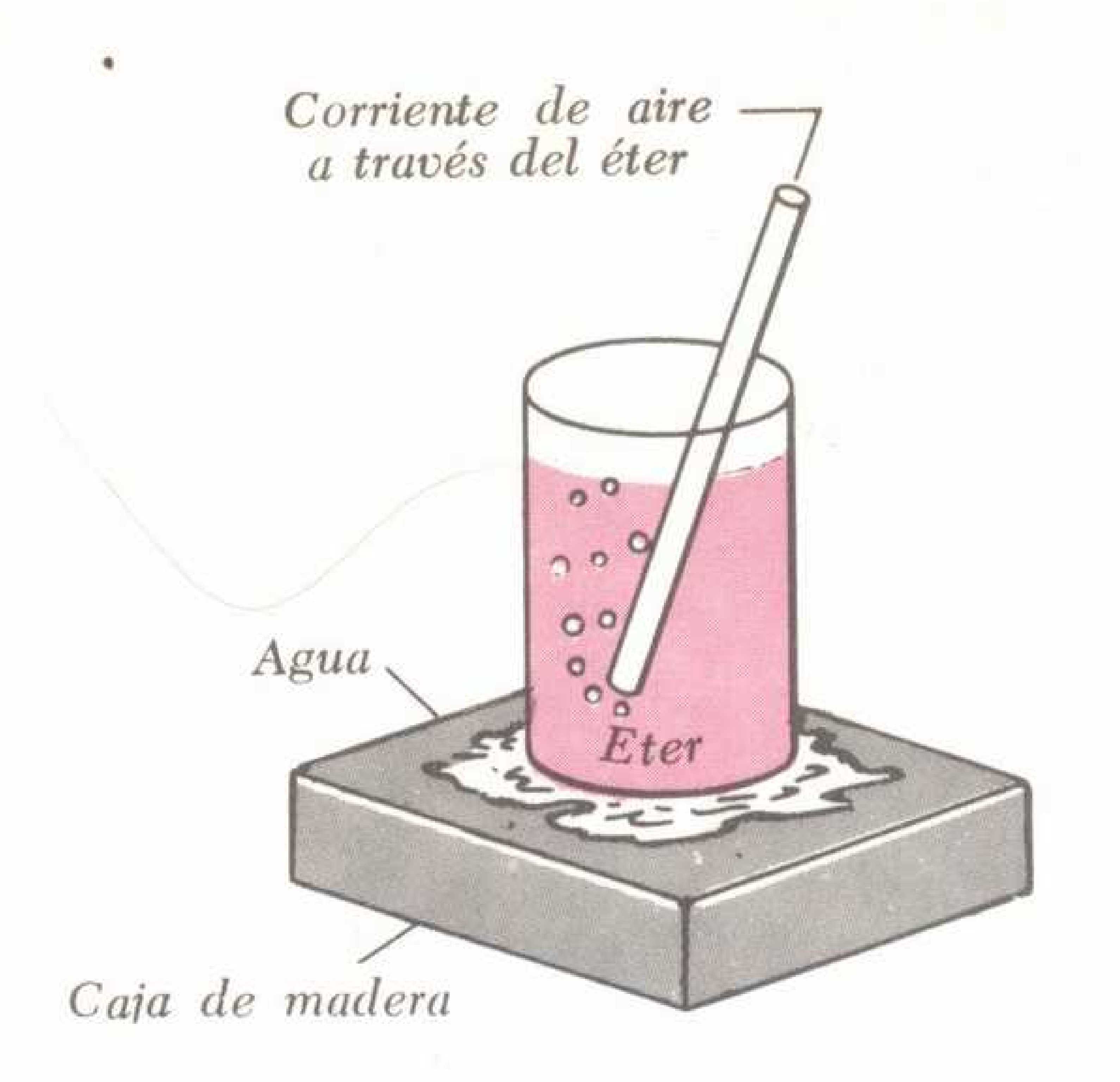


Fig. 4-15. Congelación del agua por evaporación de éter.

perimento precedente. Trate también de explicar porqué se ha utilizado una caja de madera, prefiriéndola a otra metálica.

9 DIFERENCIA ENTRE EVAPORACION Y EBULLICION

La evaporación, a diferencia de la ebullición, tiene lugar a *cualquier* temperatura; la ebullición, a una temperatura *fija,* siempre que se mantenga constante la presión exterior. La rapidez de la evaporación *aumenta con la temperatura,* como se pone de manifiesto por el hecho de que el agua de lluvia se evapora más rápidamente en tiempo caluroso. El *aumento de la superficie* libre de un líquido también acelera el proceso de evaporación. Las ropas, por ejemplo, se secan más rápidamente cuando se tienden sobre los alambres que si se dejan amontanadas; también los líquidos se evaporan más pronto estando en frascos de boca ancha que en botellas de cuello estrecho. Por último, se aumenta la evaporación si se aparta continuamente el vapor formado, de la superficie del líquido. Poniendo en movimiento mediante un ventilador el aire húmedo que nos rodea en un día bochornoso, el equilibrio que existía entre la evaporación y la condensación se destruye, pasando mayor cantidad de humedad del cuerpo al estado gaseoso.

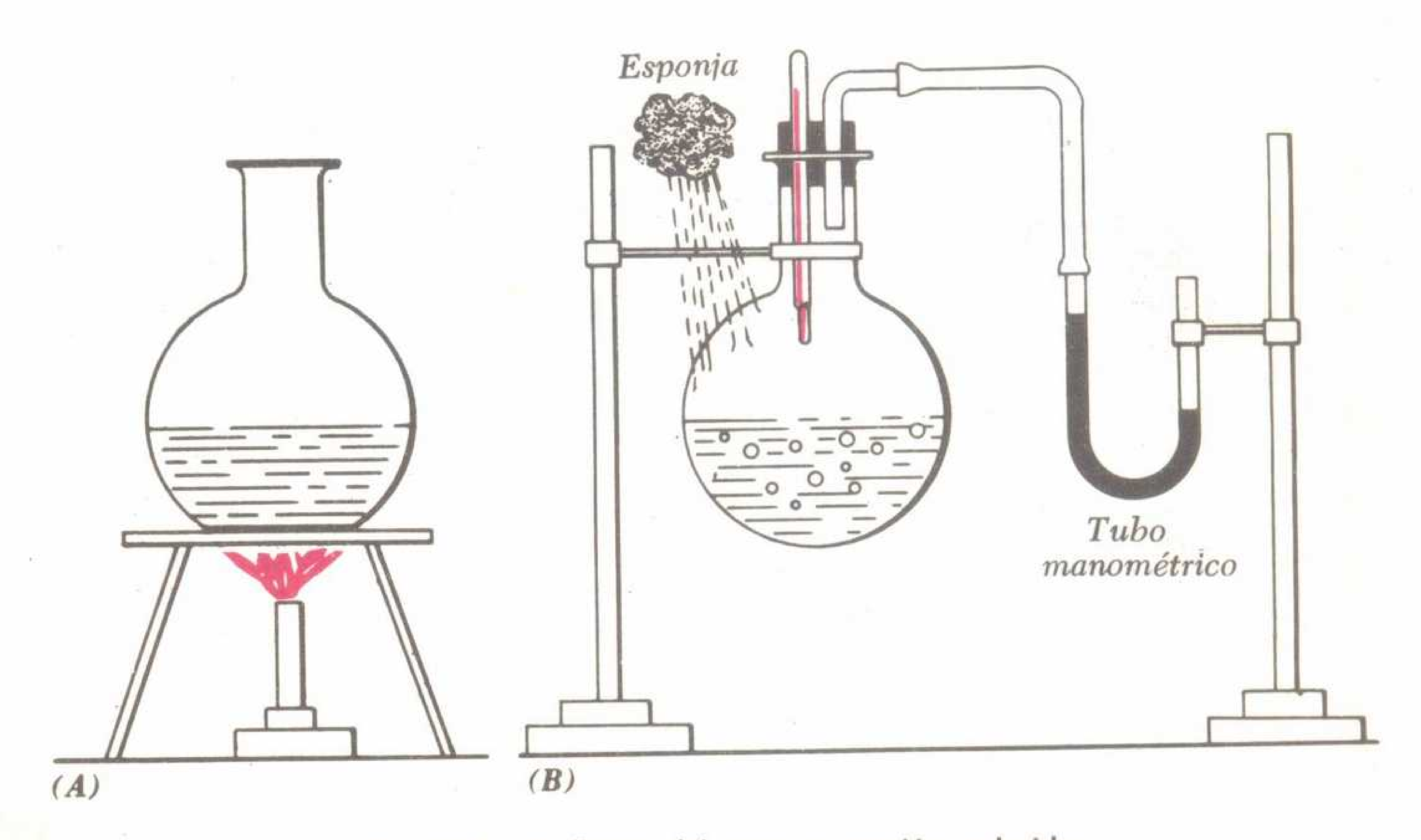


Fig. 4-16. Ebullición del agua a presión reducida.

Vamos a estudiar ahora con cierto detalle el proceso de ebullición que tiene lugar cuando la *presión de vapor del líquido es exactamente igual a la presión exterior ejercida sobre su superficie*. Vemos en la fig. 4-16 (A) un matraz bierto, lleno de agua utilizada para el experimento, contiene generalmente cierta cantidad de aire disuelto, que en seguida se expulsa por la acción del calor. Las *burbujas de aire* que se producen no deben confundirse con las de vapor, que con el agua por debajo del punto de ebullición, no se podrán formar a través de toda su masa. (Algunas podrán hacerlo en el fondo del matraz, pero desaparecerán antes de llegar a la superficie). A medida que continúa el calentamiento, la presión de vapor se aproxima a la presión atmosférica normal de 1 kg/cm² y una vez alcanzada, se forman libremente las burbujas de vapor en todo el líquido, diciéndose entonces que está en *ebullición*.

Apagando ahora la llama, se cierra rápidamente el matraz mediante un tapón con dos agujeros, en uno de los cuales se encuentra un termómetro mientras que el otro comunica con un tubo manométrico con mercurio. En la fig. 4-16 (B) se ve la nueva disposición del aparato. Colocado el tapón, se rocía el matraz con agua fría con lo que se condensa el vapor que lo llena desapareciendo el equilibrio previamente establecido entre las presiones interior y exterior. Siendo ésta mucho menor ahora, se necesita menor presión de vapor para producir la ebullición, que continúa a una temperatura muy por debajo de la normal (100°C). El termómetro señala los nuevos puntos de ebullición y el desplazamiento del mercurio hacia la rama izquierda indica la disminución de presión. Efectuando el experimento colocando el matraz de agua hervida bajo la campana de la máquina neumática, la temperatura del agua, al hacer el vacío, puede descender lo suficiente para formar hielo. Al ocurrir ésto, la temperatura y presión en que puede existir simultáneamente hielo, agua y vapor de agua, recibe el nombre de *punto triple* (0,01°C y 0,46 cm de mercurio de presión).

Elevando la presión exterior por encima de su valor normal al nivel del mar (1 kg/cm², aproximadamente), el punto de ebullición *aumenta*. Si por ejemplo la presión es de 2 kg/cm² (aproximadamente) la ebullición no tendrá lugar hasta que se haya comunicado suficiente calor al agua para que su presión de vapor sea igual a 2 kg/cm². Vemos en la Tabla 4-1 que corresponderá en este caso un punto de ebullición de 120°C. Evidentemente,

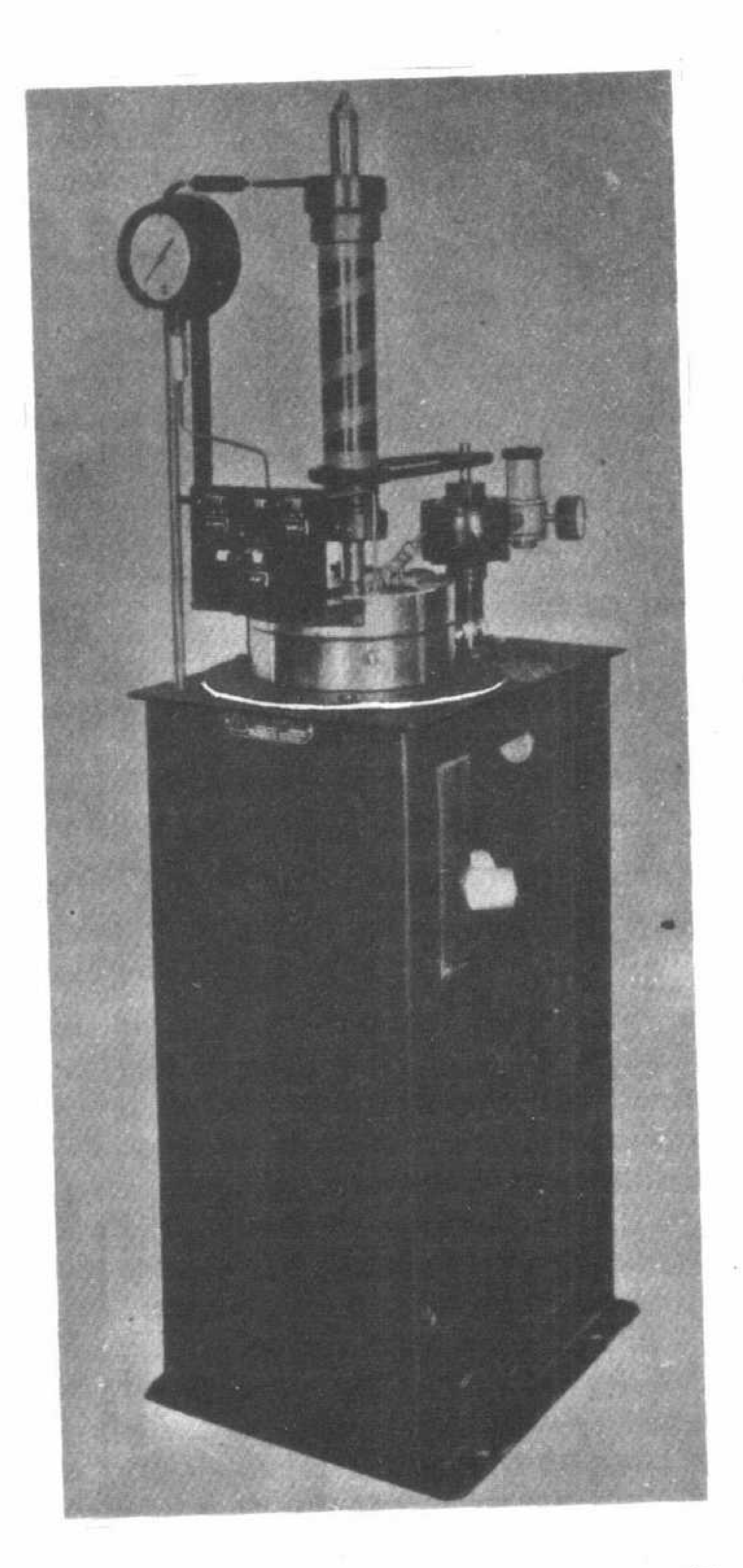


Fig. 4-17. Autoclave con agitación magnética. Capacidad aproximada, 4 litros.

la disposición ilustrada en la fig. 4-16 no permite la realización de este experimento.

Los líquidos se hacen hervir a temperaturas superiores a la normal en las *marmitas* u *ollas de presión* y en las *autoclaves* (fig. 4-17). Estos dispositivos permiten aumentos apreciables en el punto de ebullición, acelerando los procesos de cocción y la velocidad de las reacciones químicas. Por razones de seguridad, utilizan válvulas de seguridad y manómetros, en especial las autoclaves. En lugares situados a mucha altitud, el agua hierve a temperaturas apenas superiores a 80°C, como ocurre, por ejemplo, en la cima del Pico Pike, en Colorado (EE.UU. de Norteamérica). El uso de ollas a presión permite la cocción de ciertos alimentos, en estos casos.

La presencia de cuerpos disueltos puede *aumentar* o *disminuir* el punto de ebullición de un líquido. Añadiendo sal común al agua, se aumenta el punto de ebullición; pero añadiendo alcohol, se disminuye. La pizca de sal que se añade al agua en la cocción, apenas aumenta en un grado su punto de ebullición.

10 HUMEDAD ATMOSFERICA

La cantidad de vapor de agua existente en el aire varía considerablemente. La evaporación tiene lugar en los océanos, mares, ríos, lagos, en el suelo, en la vegetación, etc. La condensación del vapor de agua en forma de lluvia o nieve equilibra el proceso de evaporación.

La masa real de vapor de agua que se encuentra presente en la unidad de volumen de aire, es la *humedad absoluta*, que puede expresarse en gramos por metro cúbico. Se determina absorbiendo el vapor contenido en la unidad de volumen mediante ácido sulfúrico concentrado o cloruro cálcico. (Los agentes que absorben la humedad se llaman *deshidratantes*).

Humedad relativa es la relación entre la cantidad de *vapor de agua existente en un volumen determinado y la cantidad que saturaría al mismo volumen, a igual temperatura.* Si el contenido real de vapor de agua es igual a la cantidad máxima, necesaria para alcanzar la saturación a la misma temperatura, la humedad relativa es del 100 %. Una humedad relativa del 50 % significa que el espacio en cuestión contiene la mitad de vapor de agua que contendría si estuviese saturado.

La humedad relativa puede también considerarse bajo el punto de vista de la *presión de vapor*. Se recordará que la presión a la cual pueden existir juntos un líquido y su vapor, a una temperatura dada, se definió como *presión de saturación de vapor* para aquella temperatura. Si el vapor ejerce una presión parcial, inferior a la de saturación, la humedad relativa, definida ahora como *relación entre la presión real del vapor y la de saturación,* es inferior al 100 %. Evidentemente, la presión parcial del vapor no puede exceder la de saturación, puesto que de ocurrir, se condensaría inmediatamente en forma de niebla, rocío o escarcha. Debe observarse que las dos definiciones de humedad relativa son muy de cerca equivalentes entre sí, puesto que la relación de presiones es aproximadamente igual a la relación correspondiente de densidades de vapor.

La humedad relativa puede determinarse con ayuda del *higrómetro de punto*

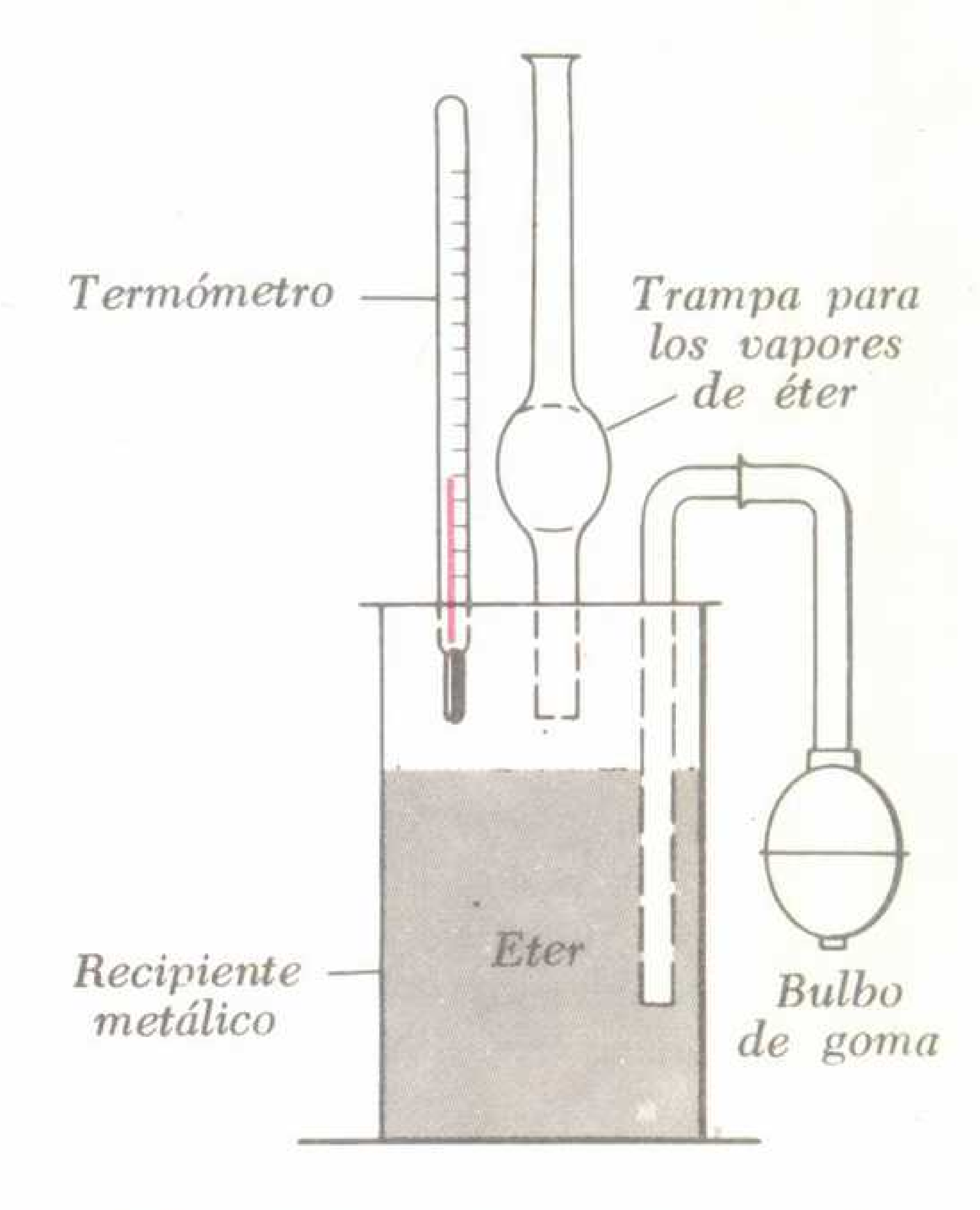


Fig. 4-18. Aparato para determinar el punto de rocío.

de rocío (fig. 4-18). Punto de rocío es la temperatura a la cual se empaña, por condensación de la humedad, una superficie metálica brillante, perfectamente pulimentada. Es también la temperatura para la cual la presión del vapor de agua existente es numéricamente igual a la de saturación. En el sencillo aparato que se representa, la temperatura a que se condensa la humedad ambiente sobre el recipiente metálico se lee en el termómetro. El descenso de temperatura se obtiene evaporando éter. La corriente de aire producida por el bulbo de goma, acelera la evaporación y una trampa especial recoge el éter pulverizado.

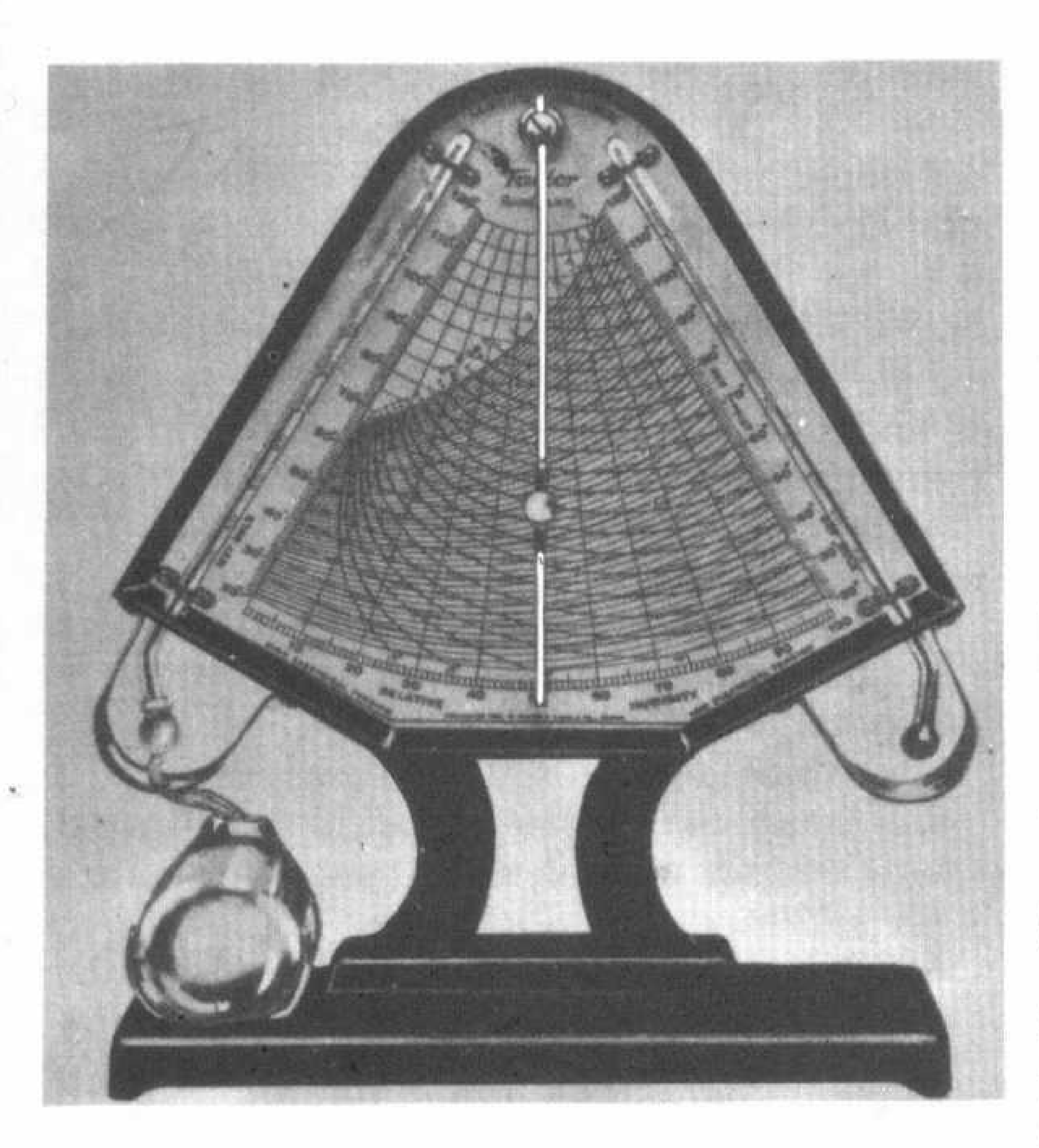


Fig. 4-19. Psicrómetro provisto de tabla para el cálculo de la humedad relativa ambiente.

Supongamos que el punto de rocío sea igual a 0°C, mientras que la temperatura del aire a cierta distancia del aparato es de 20°C. Como el aire que se encuentra en contacto con el metal frío está saturado, podemos averiguar mediante una tabla su presión de vapor. Vemos que es de 4,58 mm de mercurio. Para el aire ambiente, la presión de saturación sería de 17,5 mm de mercurio. La humedad relativa es, pues, 4,58 : 17,5 = 0,262 o sea 26,2 %.

En la fig. 4-19 se ve un *psicrómetro*, aparato que consta de dos termómetros iguales, uno de los cuales tiene el depósito constantemente humedecido por una mecha sumergida en agua. La evaporación de ésta, absorbiendo calor, hace descender la temperatura del termómetro húmedo, descenso tanto más pronunciado cuanto menor sea el contenido de vapor de agua en el aire. El aparato tiene una tabla que permite determinar la humedad relativa ambiente según la diferencia de lectura de los termómetros. La tabla se ha calculado según la fórmula proximada

$$\varphi = \frac{p_h - 0{,}5\,d}{p_s}$$

en la que φ es la humedad relativa, p_h la presión de vapor correspondiente al termómetro húmedo, p_s la correspondiente al termómetro seco y d la diferencia entre las temperaturas de ambos.

Las indicaciones del psicrómetro, para ser lo más precisas posible, requieren buena circulación de aire alrededor de la mecha que humedece uno de los termómetros. De aquí que se construyen también según la disposición que se ve en la fig. 4-20, que permite hacer girar rápidamente al aparato en el aire. La humedad se determina mediante las tablas correspondientes. También hay higrómetros que se basan en la variación que experimenta la *resistencia eléctrica* de ciertos cuerpos tales como el cloruro de litio, al estar expuestos a la humedad del aire.

La humedad relativa aumenta si crece el contenido de vapor de agua en el recinto de que se trate y también al disminuir la temperatura en el mismo, sin modificar la cantidad de vapor. Por el contrario, la humedad relativa desciende si disminuye la cantidad de vapor de agua o si aumenta la temperatura.

La comodidad del hombre con respecto a las condiciones del ambiente es función (matemáticamente indeterminada por ahora) de la temperatura y de la humedad relativa, siendo el primero el factor más importante. Teniendo esto en cuenta,

el Servicio Meteorológico de los EE.UU. de Norteamérica ha propuesto un *índice de comodidad*, que responde a la fórmula empírica

$$I_c = 0{,}72\ (T_s + T_h) + 40{,}6$$

en la que I_c es el índice de comodidad, T_s la temperatura del termómetro seco y

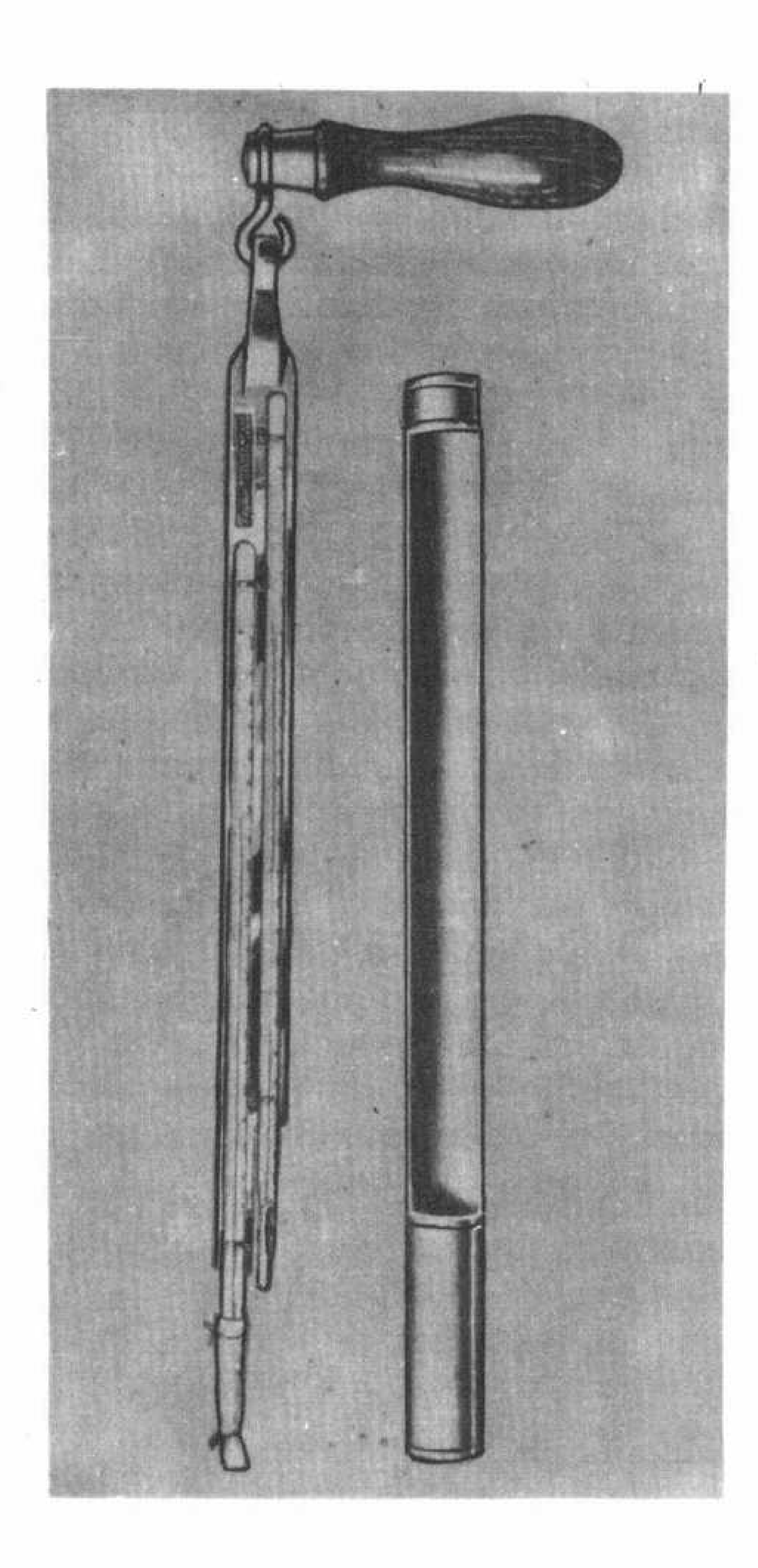


Fig. 4-20. Psicrómetro de honda.

T_h la del húmedo. Se considera que un índice de 70 representa condiciones de comodidad para todos los que se encuentren en la zona sujeta a estudio. La cifra 80 indicaría lo contrario y un índice de 75 significaría que un 50% de la población se sentiría incómoda.

11 LICUACION DE LOS GASES: CRIOGENIA

Ciertos gases, tales como el amoníaco, el anhídrido carbónico, el ácido clorhídrico y los vapores, como los del alcohol, pueden licuarse aplicando presiones suficientemente elevadas, aún a la *temperatura ambiente*. Otros gases, como el oxígeno, nitrógeno, hidrógeno y helio —considerados antiguamente como "permanentes"— no pueden licuarse por la sola aplicación de presión, por *grande que sea*. Sin embargo, *pueden* pasar al estado líquido enfriándolos previamente a la temperatura llamada *crítica* y sometiéndolos entonces a la presión adecuada o *crítica*, que en su punto de licuación, es la misma que la *presión crítica de vapor* del gas. Así, es preciso enfriar el oxígeno a —119° C a cuya temperatura basta una presión de 50 atmósferas para licuarlo. El helio necesita —268° C licuándose entonces con una presión de 2,3 atm solamente. El aire tiene una temperatura crítica de

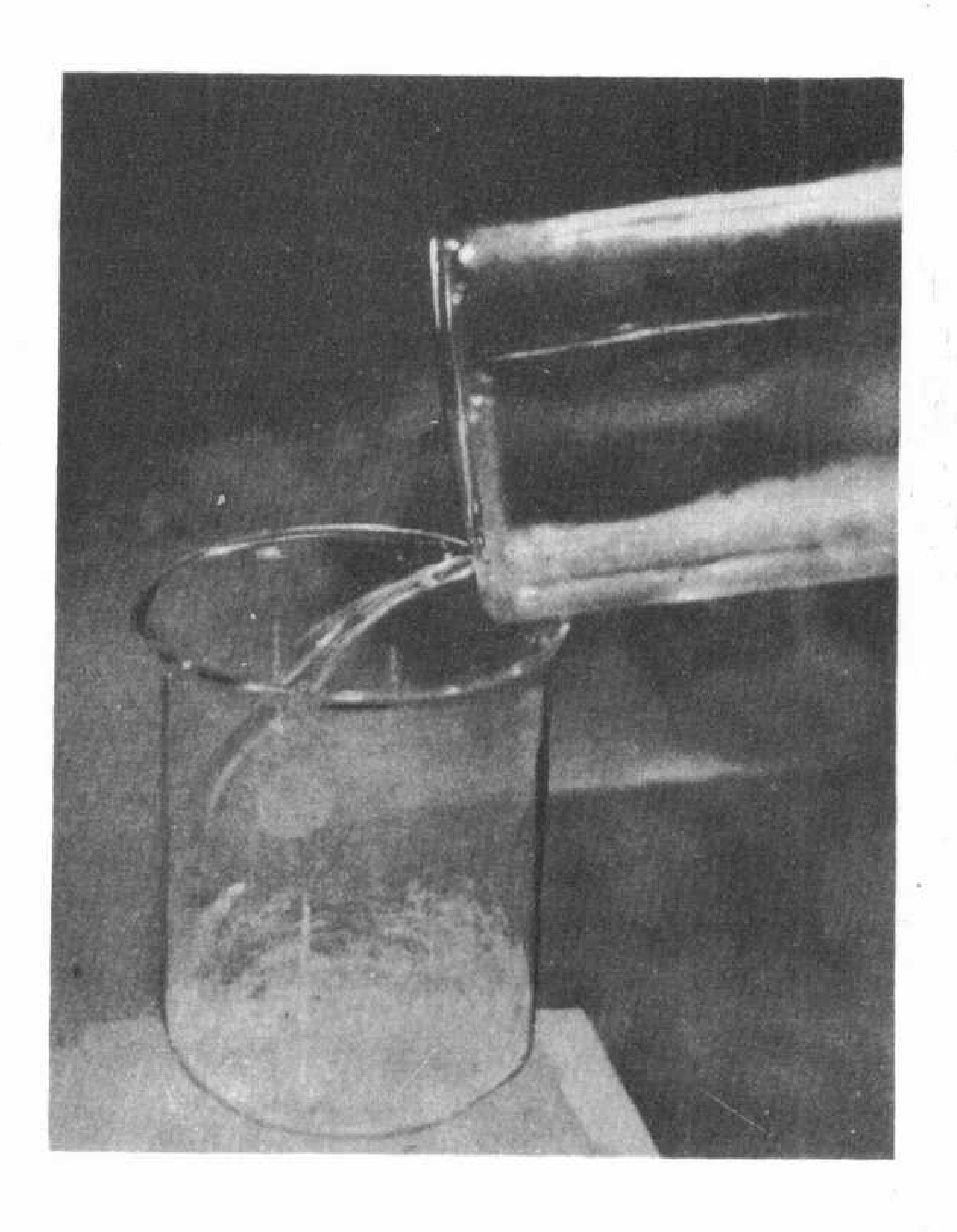


Fig. 4-21. Llenando un vaso con oxígeno líquido.

—141° C y no hay presión que sea capaz de licuarlo por encima de dicho valor. A —141° C bastan unas 37 atm.

Los detalles de las instalaciones necesarias para estas operaciones son demasiado técnicos para nuestro propósito. Bastará saber por ahora que el aire se licúa comprimiéndolo y enfriánlolo; la temperatura final, o sea la crítica, se logra dejando expansionar el propio aire comprimido. Los laboratorios destinados al trabajo con temperaturas muy bajas se llaman *criogénicos*. En la fig. 4-21 se ve la operación de llenar un vaso de oxígeno líquido, mientras que la fig. 4-22 representa el llenado de un vaso Dewar con helio líquido procedente de un "criostato".

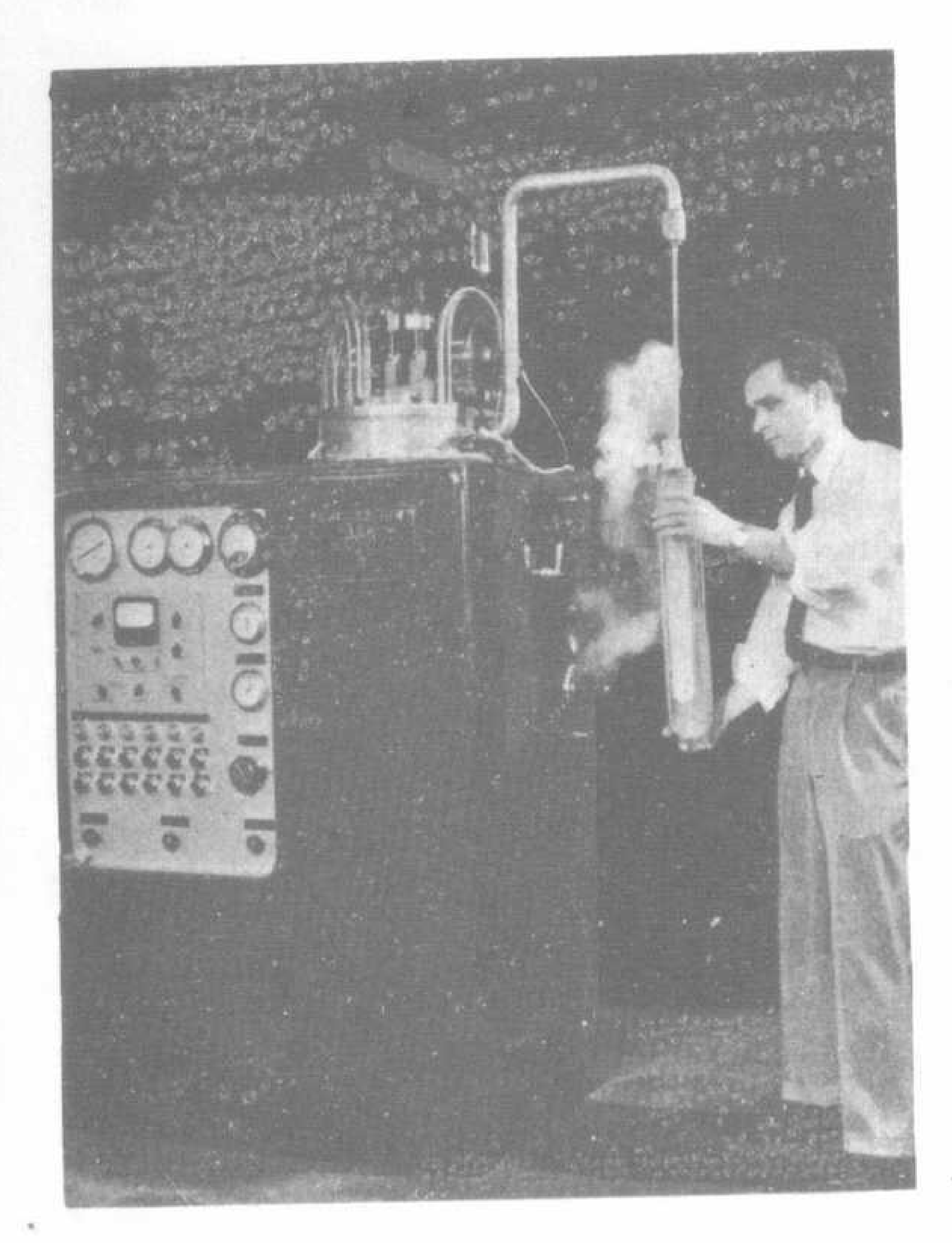


Fig. 4-22. Llenado de un frasco Dewar con gas licuado procedente de un criostato.

Recientemente ha adquirido gran interés el estudio del comportamiento de los cuerpos a temperaturas extremadamente bajas, obtenidas mediante gases licuados. (Se han alcanzado temperaturas tan bajas como 10^{-5} grados Kelvin). Con nitrógeno líquido, cuya temperatura es de 77,4°K, se pueden realizar sorprendentes experimentos. Sumergido en dicho líquido, un alambre de plomo arrollado en hélice se transforma en un resorte, una barra del mismo metal suena como una campana al golpearla, un tubo de goma se rompe, una pelota de goma se hace pedazos como si fuera de vidrio, las uvas se endurecen y suenan como bolitas para jugar y puede usarse un "martillo" de mercurio para clavar clavos en una tabla. Entre las investigaciones de particular importancia en criogenia, puede mencionarse la *superconductividad eléctrica, nuevas reacciones químicas* y determinados aspectos de la *física del estado sólido.*

REPASO

Preguntas

1 ¿Sería conveniente utilizar agua a 0°C en lugar de hielo, con propósito de refrigeración? Expóngase argumentos en favor o en contra de esta idea.

2 ¿Es buen o mal sistema envolver el hielo en papel o en una tela antes de colo-locarlo en una heladera de hielo? Explíquese el fundamento de la respuesta.

3 El hielo seco (anhídrido carbónico sólido), el alcanfor y el iodo pasan directamente del estado sólido al gaseoso (se subliman). ¿Estos cuerpos, absorben o ceden calor en dicho proceso?

4 Un trozo de hielo a 0°C funde en un vaso de vidrio. ¿Cuál es la temperatura de la mezcla hielo-agua cuando el hielo está (*a*) a medio fundir, (*b*) fundido en un 90 %?

5 ¿Qué cantidad de hielo a 0°C puede fundirse comunicándole 2.400 cal? ¿Habrá variación en la energía cinética de las moléculas de dicho cuerpo? ¿Qué instrumento justificaría la respuesta a la anterior pregunta?

6 ¿Qué relación tiene el calor de fusión de un cuerpo expresado en Btu por libra con respecto al mismo expresado en cal/g?

7 Para preparar helados, se emplea frecuentemente una mezcla frigorífica formada por hielo triturado, agua y sal común. ¿Es el helado o la mezcla refrigerante que (*a*) absorbe calor, (*b*) cede calor, (*c*) funde, (*d*) se congela?

8 Con respecto a la configuración molecular, ¿cómo podría explicarse que el agua de fusión del hielo es más densa que éste?

9 Se llenan dos vasos con igual cantidad de agua fría a 15°C. Se hace pasar vapor a 100°C por uno de ellos y se añade al otro igual cantidad de agua hirviente (a 100°C). ¿Qué relación habrá entre las temperaturas de las mezclas resultantes? Dése una razón para la respuesta.

10 ¿Puede condensarse vapor a 100°C haciéndolo burbujear a través de agua a 100°C? ¿Cuál es el motivo de la respuesta?

11 Compárense masas iguales de agua hirviente y de vapor, ambas a 100°C, con respecto a (*a*) energía interna total, (*b*) componente de energía potencial, (*c*) componente de energía cinética.

12 ¿Puede formarse vapor saturado sobre la superficie de un líquido depositado en un plato abierto? Dése una justificación a la respuesta.

13 Una persona que usa lentes observa que se empañan cuando en un día frío pasa de una habitación caliente al exterior. Explíquese por qué.

14 El agua tiene buenas propiedades como acumulador de calor y el vapor es más apto para calefacción. Explíquese por qué.

15 Un tubo de vidrio herméticamente cerrado, de paredes gruesas, contiene anhídrido carbónico líquido. Se lo coloca en un recipiente con agua, calentándolo a la temperatura crítica del CO_2 (31,1°C). ¿Qué podemos anticipar con respecto al menisco (superficie de separación de las dos fases)? ¿En qué se basa la respuesta?

Problemas

1 Se llenan dos vasos con cantidades iguales de agua a 60°C. Se añade un poco de hielo a uno de ellos e igual masa de agua a 0°C al otro. ¿Cuál de las dos mezclas alcanzará menor temperatura? ¿Por qué?

2 Se transforma un cubo de hielo a 0°C en agua a 0°C. ¿Qué cantidad de calor hay que sustraer de las inmediaciones (*a*) por gramo de hielo fundido? ¿(*b*) por kilogramo? ¿(*c*) por libra?

3 ¿Cuánto calor debe substraerse para solidificar 100 g de agua a 20°C?

4 Se desea transformar X g de hielo a 0°C en agua a 20°C. ¿Cuántas calorías deben suministrarse? ¿Cuántas kilocalorías?

5 Se suministran 2.880 Btu a 30 libras de hielo a 32°F. ¿Cuánto hielo queda sin fundir?

6 Se comunican 200 cal a 2 g de hielo a 0°C. ¿Cuál es el estado físico y la temperatura del producto resultante?

7 ¿Cuál es la temperatura final de una mezcla de 20 g de agua a 30°C con 9,5 g de hielo a 0°C? Descríbase detalladamente la naturaleza de la mezcla cuando se alcanza el equilibrio.

8 Se colocan 30 g de hielo a 0°C en 400 g de agua a 80°C. ¿Cuál es la temperatura de la mezcla?

9 Se añaden 5 libras de hielo a 32°F a 50 libras de agua a 100°F. ¿Cuál es la temperatura de la mezcla?

10 ¿Cuántos gramos de hielo a 0°C se necesitan para enfriar 500 g de agua desde 85°C hasta 25°C?

11 Se condensan 10 g de vapor a 100°C enfriándolos luego hasta formar agua a 80°C. ¿Cuánto calor se cede a los cuerpos próximos?

12 ¿Cuántas unidades térmicas inglesas se necesitan para transformar 10 libras de hielo a 32°F en vapor a 212°F?

13 ¿Qué masa de vapor a 100°C debe añadirse a 250 g de agua a 45°C para elevar su temperatura a 75°C?

14 Determinar la temperatura resultante cuando se hacen pasar 5 libras de vapor a 212°F a través de 500 libras de agua a 40°F.

15 ¿Cuánta cantidad de calor se necesita para transformar 40 g de hielo a —10°C en vapor a 110°C? Supóngase que el calor específico del hielo y del vapor son iguales a 0,5 cal/g/°C.

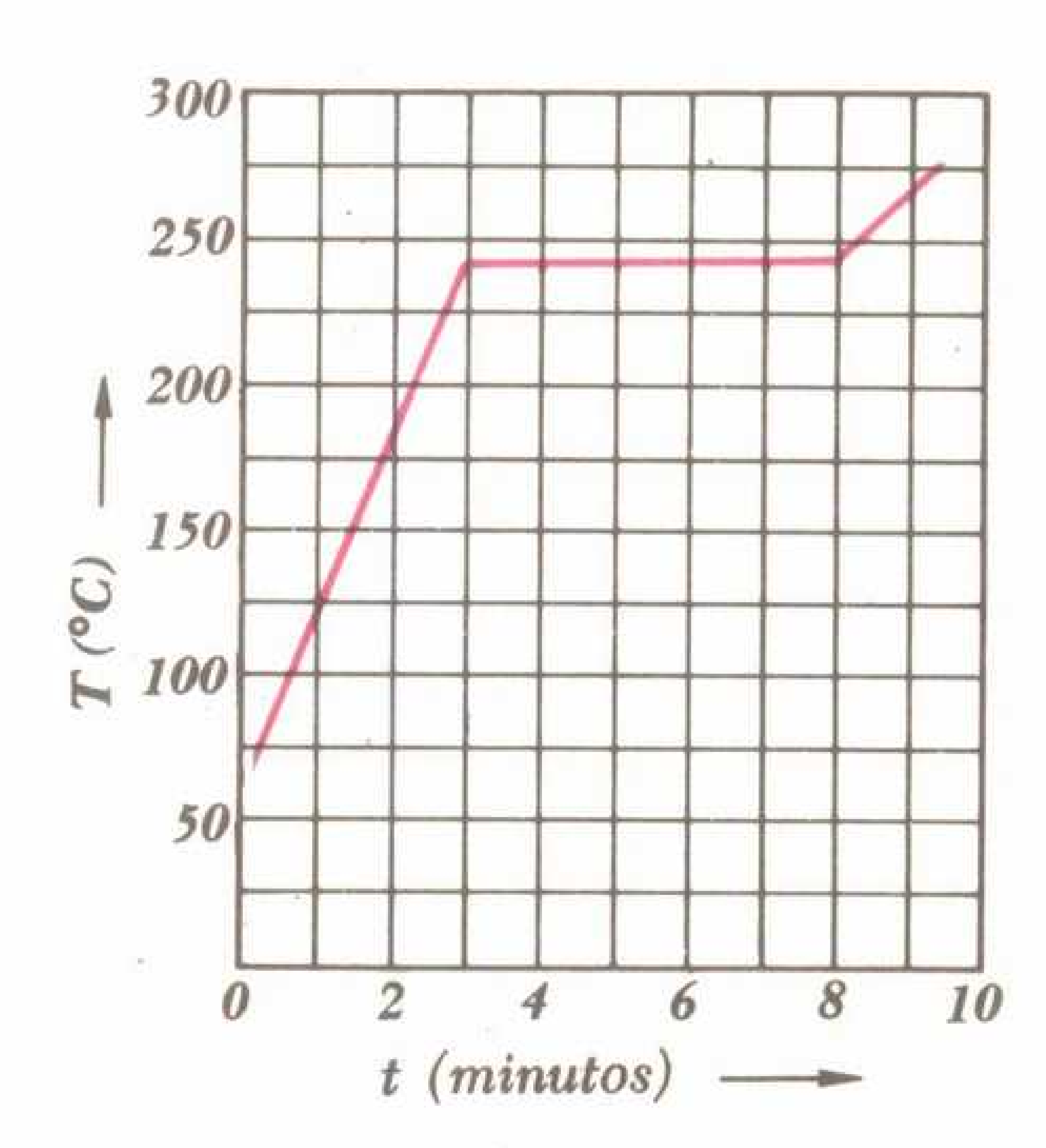
16 La densidad de saturación (humedad absoluta máxima) a 30°C es de 30 g/m³. Si la humedad absoluta reinante es de 20 g/m³, a la misma temperatura, ¿cuánto vale la humedad relativa?

17 El gráfico de la derecha representa variaciones de temperatura observadas cuando a una masa de 72 g de cierto metal se le suministra calor de manera uniforme a razón de 200 cal/min.

(*a*) ¿Cuál es el punto de fusión aproximado del metal?

(*b*) ¿Cuántas calorías absorbe en el proceso de fusión?

(*c*) ¿Cuál es el calor de fusión del metal?



MAQUINAS TERMICAS

5

1 EQUIVALENTE MECANICO DEL CALOR

Por todas partes podemos encontrar ejemplos de energía considerada comúnmente *perdida*. Motores y generadores rotativos, tubos de rayos X en funcionamiento, diapsasones que vibran, parlantes de radio receptores, todos presentan un rendimiento de transformación de energía útil menor del 100 %, apareciendo la energía "perdida" en forma de *calor*, inútil pero inevitable. Sabemos actualmente que en realidad no hay energía perdida y siempre que falta parte de la energía total, aparecerá una porción *equivalente* de alguna otra forma de energía. Este es el *principio de conservación de la energía* o *primera ley de la termodinámica*. Quienes previeron esta posibilidad, fueron Rumford y Davy a comienzos del siglo XIX, pero su formulación exacta llegó casi medio siglo más tarde como resultado de las investigaciones de Joule, Mayer y Clausius.

Los experimentos de Rumford en el taladrado de cañones (Capítulo 1) no solamente sugerían un parentesco entre calor y energía mecánica, sino que permitían una medición tosca de la cantidad real de trabajo mecánico necesario para generar una determinada cantidad de calor. Rumford estimaba que se necesitaban aproximadamente 143 kgm para producir 0,252 kcal. En 1843, Jaime Prescott Joule obtuvo un valor más exacto para este factor de conversión de energía, el cual, como unidad, lleva el nombre de Julio, en su honor.

El aparato de Joule consistía esencialmente en un *calorímetro* (fig. 5-1) en que el rozamiento se transformaba en calor. Utilizaba un peso de 26 kg sujeto a una cuerda pasada alrededor de una polea que ha-

cía girar un eje y con él unas paletas que agitaban una cantidad conocida de agua, dentro de un recipiente de cobre. El peso recorría periódicamente hacia arriba y

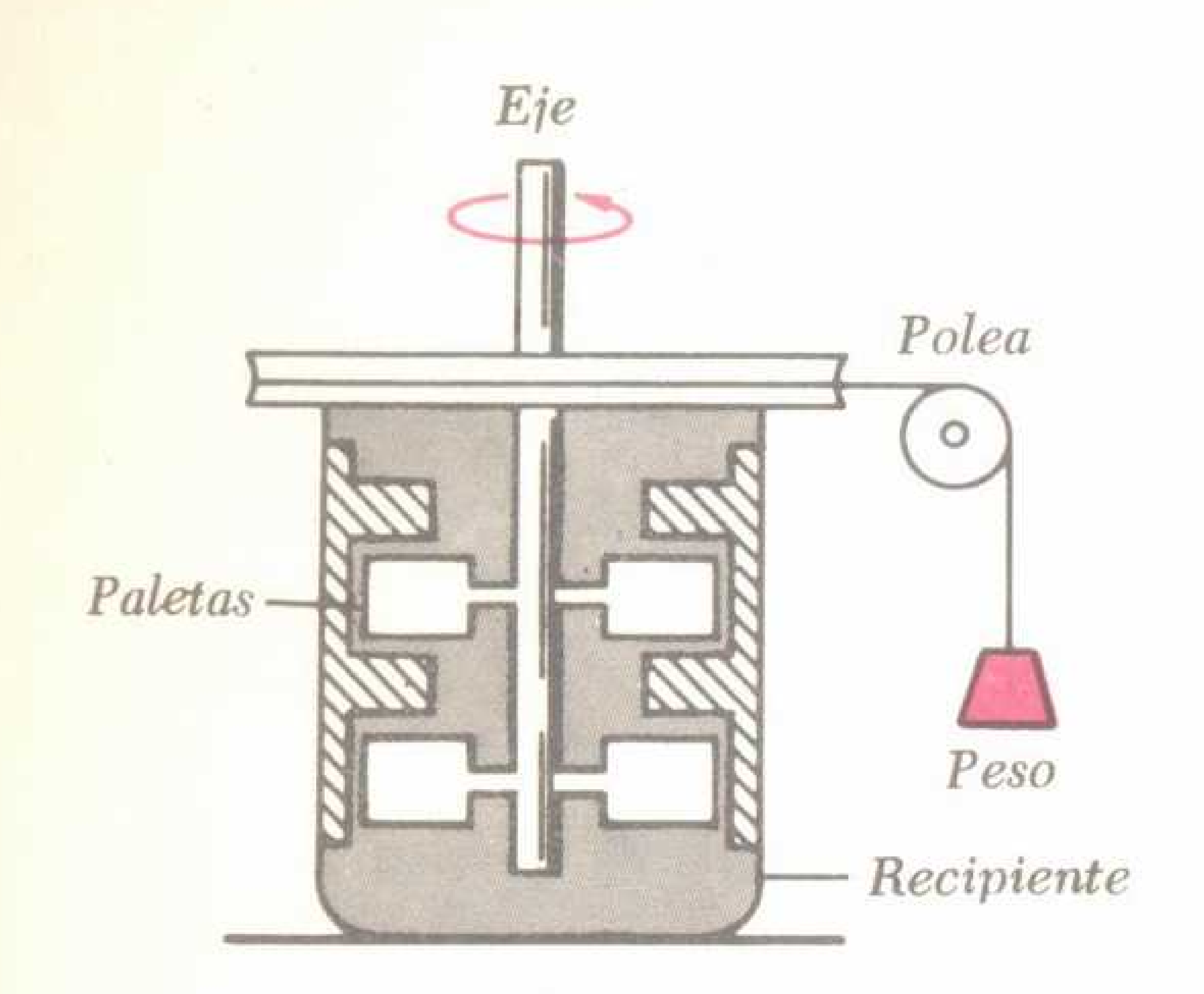


Fig. 5-1. Versión simplificada del calorímetro de Joule para la determinación del equivalente mecánico del calor.

hacia bajo una altura de 1,6 m, obteniéndose una pequeña elevación de temperatura del agua (unos 0,3°C). Joule pudo calcular la relación entre el trabajo mecánico (W) que se realizaba y la energía calorífica (Q) obtenida, estableciendo un primer valor ligeramente superior a 4,5 J/cal.

Determinaciones posteriores condujeron a valores más exactos, tomándose actualmente en la práctica 4,186 J/cal. El julio ha pasado a ser una constante física de gran importancia, cuya magnitud depende únicamente de las unidades físicas de W y Q.

Por comodidad, la expresión

$$J = \frac{W}{Q} \qquad (5\text{-}1)$$

se escribe también en las formas

$$W = JQ \qquad Q = \frac{W}{J}$$

Como 1 kcal = 4.186 J, dividiendo este valor por la aceleración de la gravedad tendremos, aproximadamente, 1 kcal = 427 kgm.

• **Problema 1.** Calcular la cantidad de calor que se producirá al caer un peso de 50 kg sobre un pavimento de concreto desde una ltura de 4 m.

Solución. La energía potencial es igual a

$$50 \times 4 = 200 \text{ kgm}$$

Esta es también la energía cinética y el trabajo mecánico W que desarrollará el cuerpo al caer. Como 1 kcal = 427 kgm, tendremos

$$Q = 200/427 = 0{,}468 \text{ kcal.}$$

2 PRINCIPIOS DE LAS MAQUINAS TERMICAS

Para volver a transformar el calor en energía mecánica, se necesita una *máquina térmica* tal como la máquina alternativa de vapor, la turbina de vapor, un motor de gasolina o diesel, motor de reacción o turbina de gas. Una cinta bimetálica rrollada en espiral (fig. 5-2) es, en cierto modo, una máquina o mejor, un motor térmico capaz de arrollarse más estrechamente al calentarse, produciendo por lo tanto una pequeña cantidad de trabajo mecánico. El procedimiento más práctico es quemar alguna clase de combustible fósil, poniendo en libertad su energía química transformándola en calor. Mediante una máquina térmica adecua-

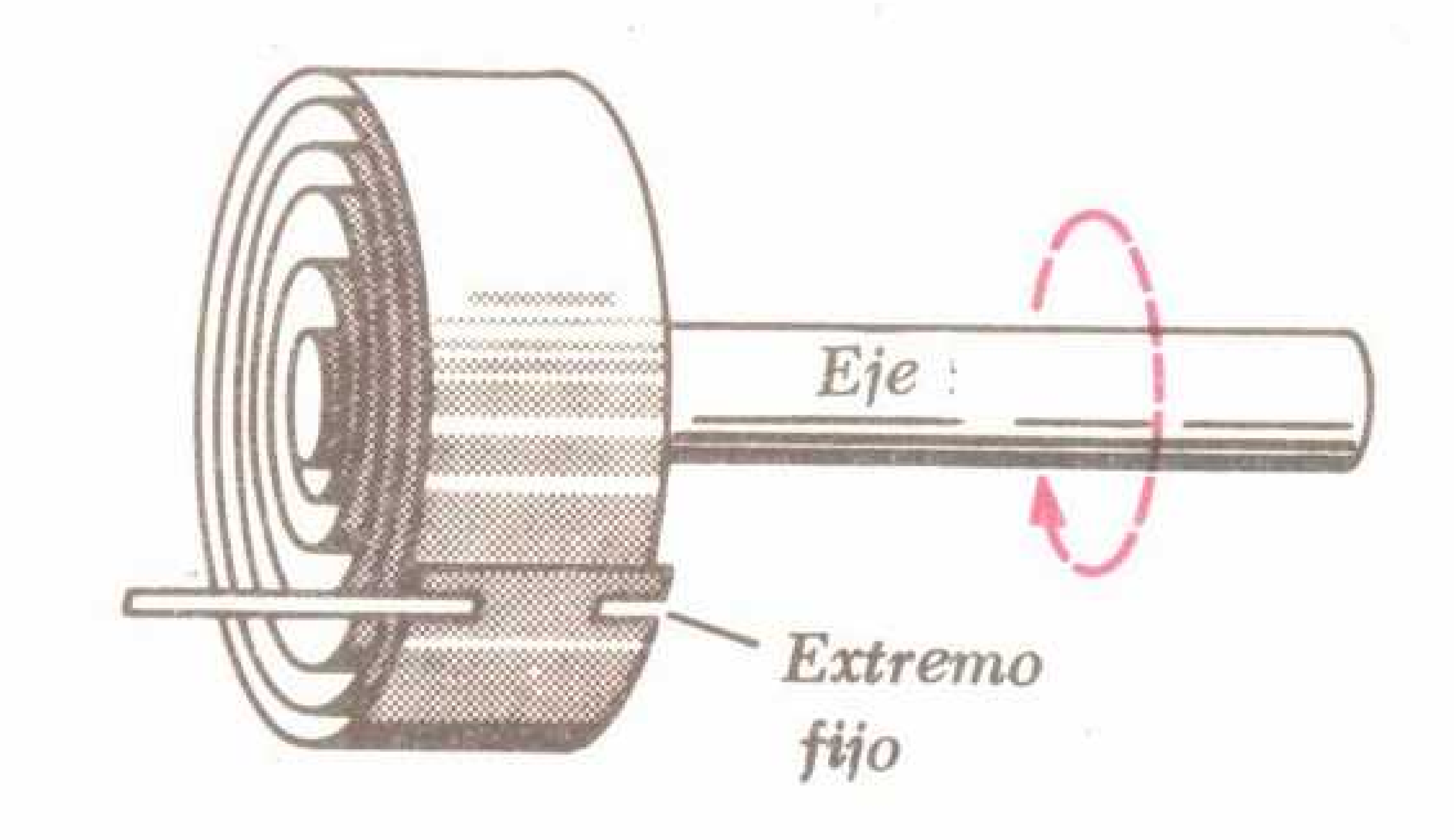


Fig. 5-2. Cinta bimetálica arrollada en espiral que puede utilizarse como motor térmico.

da, *parte* de esta energía puede transformarse en trabajo mecánico útil. El resto se devuelve al ambiente por el escape y se utiliza para vencer las fuerzas de roza-

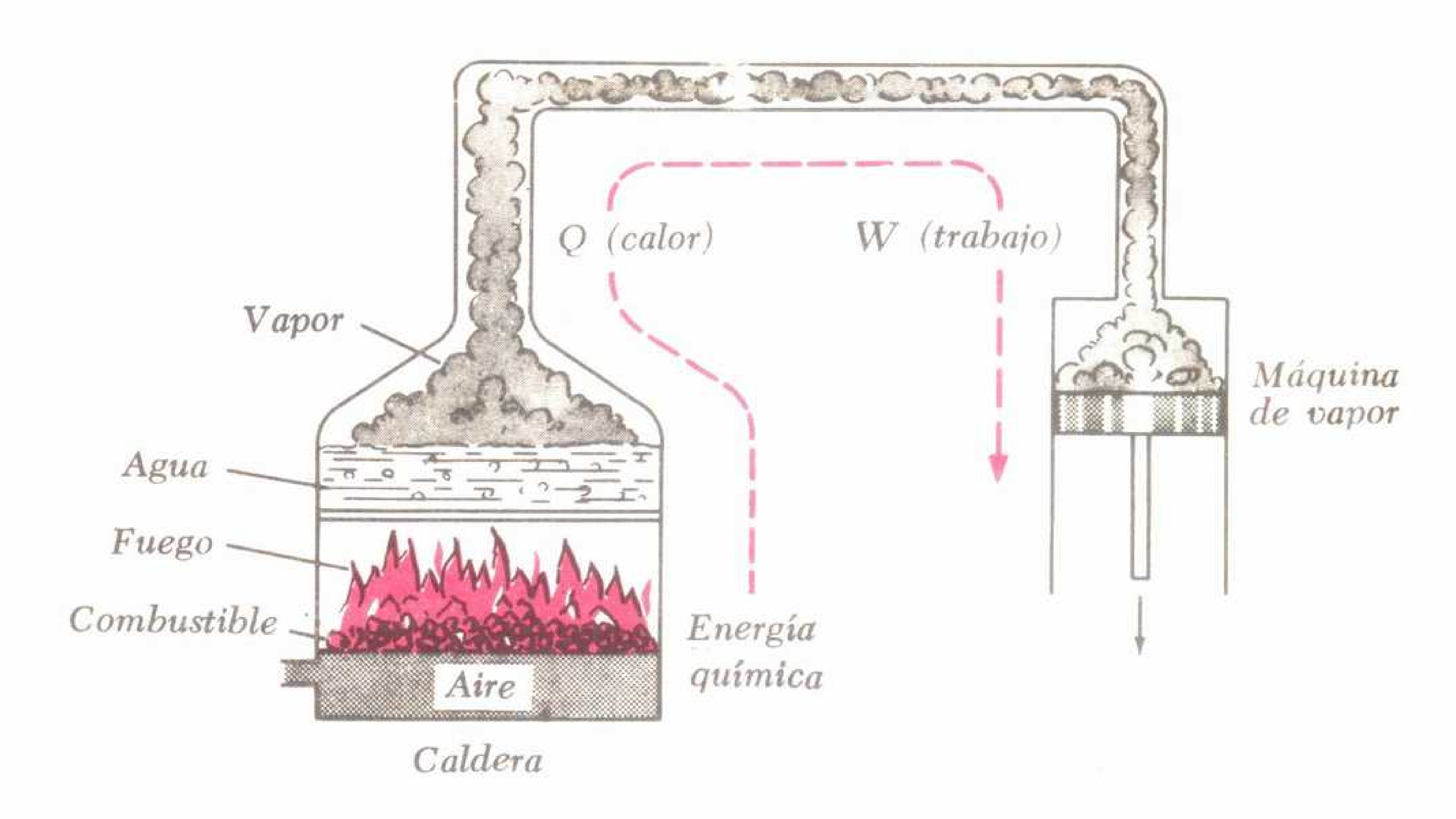


Fig. 5-3. Transformación de energía química en energía calorífica Q y finalmente en energía mecánica y trabajo, W.

miento de la máquina. En la fig. 5-3 se ha trazado un diagrama donde se ven las transformaciones de la energía que interviene en el proceso.

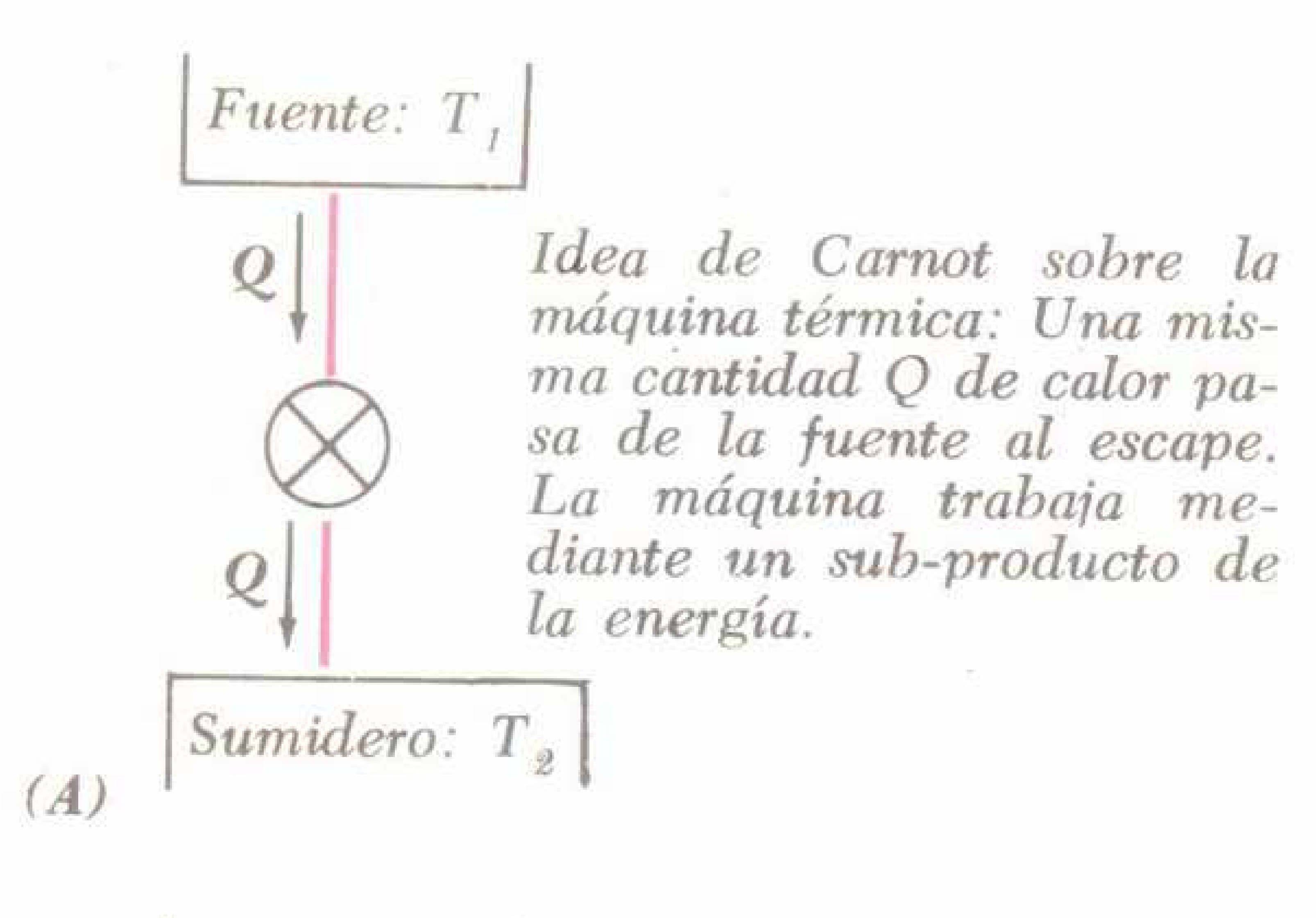
Ninguna máquina puede transformar calor en energía mecánica con un rendimiento del 100 %. La locomotora de vapor tiene, como máximo, un rendimiento de 12 %, una turbina de vapor o un motor Diesel alcanza al 35 % y un motor de reacción tiene un rendimiento máximo de solamente el 10 %. La imposibilidad de alcanzar esta transformación perfecta de energía constituye la *segunda ley de la termodinámica.*

El ingeniero francés Sadi Carnot fue quien primero se interesó en la teoría de la máquina. Carnot era partidario de la teoría del *calórico* y por lo tanto desconocedor todavía del principio de conservación de la energía. Consideraba el flujo de calor a través de una máquina como algo similar al flujo de agua a través de una turbina hidráulica, recibiendo la misma cantidad *de energía* (Q en la parte A de la fig. 5-4) de la *fuente* que la descargada en el *escape.* La máquina térmica situada entre la admisión y el escape trabajaba, según Carnot, mediante una especie de "sub-producto" energético. Su contribución más valiosa fue su insistencia en que debe existir una *caída de temperatura* ($T_1 - T_2$) entre la fuente y el escape para que el calor pueda transformarse en energía mecánica.

El punto de vista actual, ilustrado en la fig. 5-4 parte (B) considera que solamente una parte del calor admitido pasa al escape, mientras que el resto se convierte en energía mecánica al recorrer la máquina térmica. Según ésto, $Q_1 > Q_2$ y la diferencia $Q_1 - Q_2$ representa W, o sea el trabajo mecánico producido por la máquina.

El *ciclo ideal* o de la *máquina térmica de Carnot* pone claramente de manifiesto cómo el cuerpo activo (vapor de agua) sufre una serie consecutiva de variaciones en cuanto a presión, volumen y temperatura mientras se encuentra en el cilindro de la máquina térmica. (No es posible construir una máquina capaz de trabajar de la manera especificada por este ciclo ideal, pero su comprensión permite inter-

pretar el ciclo real trazado por el indicador de la máquina de vapor, que automáticamente dibuja el diagrama p-V.)



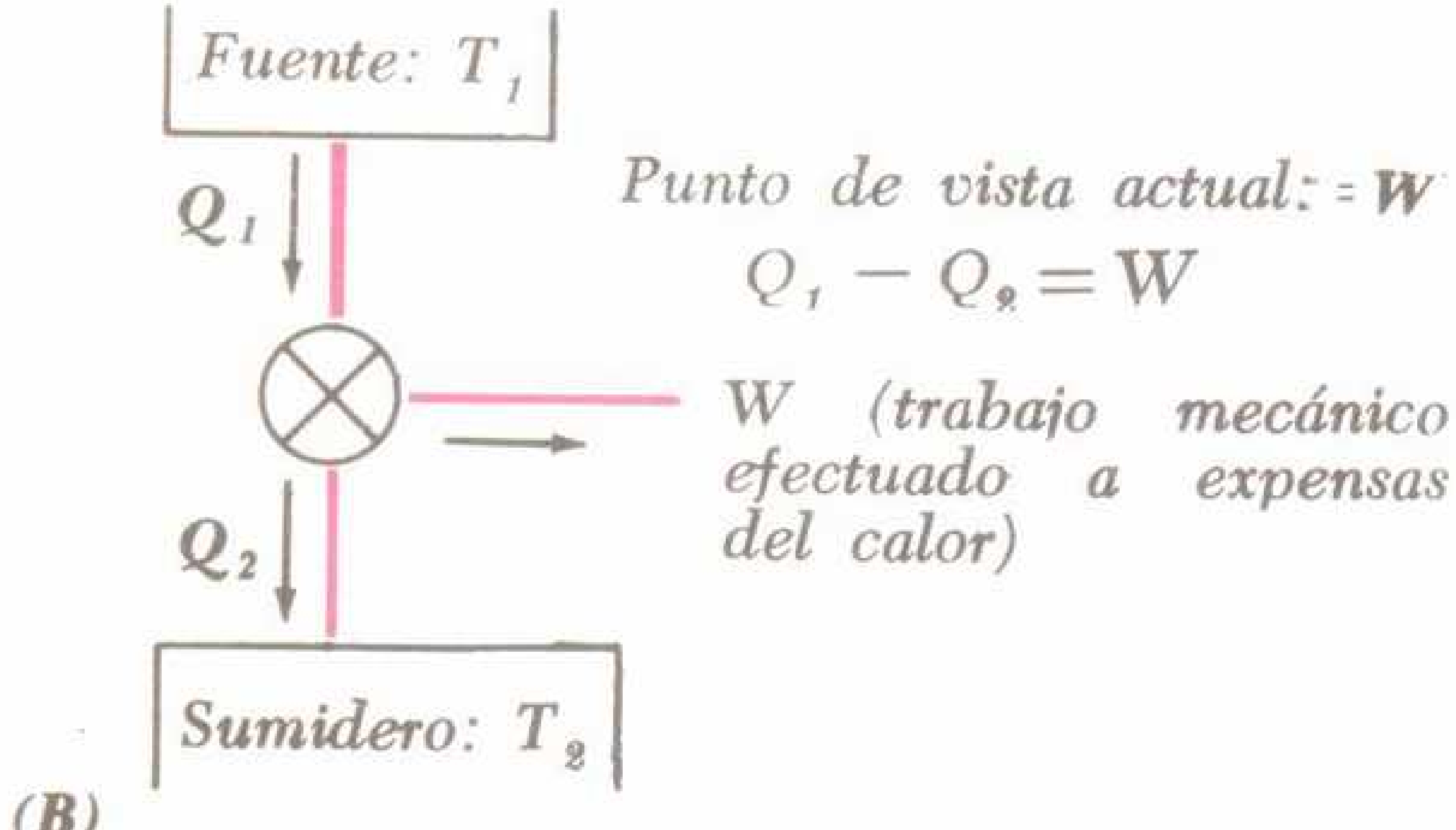


Fig. 5-4. Termodinámica de la máquina térmica: concepto antiguo y moderno.

Comenzaremos nuestro análisis mediante el cilindro dispuesto horizontalmente de una máquina, sobre el cual trazaremos un diagrama de *presiones* con respecto a *volúmenes* (p-V) para cada una de las cuatro etapas que constituyen el ciclo de Carnot (fig. 5-5). En seguida añadiremos una vista tridimensional del mismo ciclo, en el que se incluirán también variaciones de *temperatura.*

Comenzando con el cilindro lleno de vapor a la temperatura de la fuente, T_1, presión p_1 y volumen V_1 (punto 1 del diagrama) dejamos expansionar al agente que debe producir trabajo, disminuyendo su presión hasta p_2 y aumentando su volumen a V_2, permaneciendo mientras tanto sin variación su temperatura T_1 (punto 2). Esta expansión a temperatura constante se llama *isoterma* y se logra, por lo menos teóricamente, haciendo momentáneamente *perfectamente conductoras* las paredes del cilindro. Al proceso acompaña la transmisión de la cantidad Q_1 de calor de la fuente a la máquina.

Se previene el flujo adicional de calor (hacia y desde el cilindro) interrumpiendo el suministro de calor una vez alcanzado el punto 2, cubriendo el cilindro mediante un aislador perfecto. La expansión *adiabática* resultante nos conduce al punto 3, donde la presión desciende hasta p_3 mientras el volumen aumenta hasta el valor V_3. En el transcurso de esta expansión, la temperatura del vapor consumido desciende hasta la del escape, T_2.

Durante estas expansiones, el vapor efectúa trabajo *sobre* el émbolo, siendo su valor igual al producto de la fuerza ejercida sobre aquél por el camino recorrido. La fuerza es igual al producto de la superficie del émbolo A, por la presión media p dentro del cilindro. El camino que recorre el émbolo puede hallarse dividiendo la variación de volumen dentro del cilindro ($V_3 - V_1$) por la superficie A. Por lo tanto, el trabajo realizado está determinado por la expresión

$$pA \times [(V_3 - V_1)/A]$$

o sea $p \times (V_3 - V_1)$. Gráficamente equivale al área sombreada 1-2-3-5-6-1 del diagrama.

Comprimimos luego al agente ejerciendo fuerza sobre el mismo haciendo retroceder al émbolo. Esto produce otra isoterma, 3-4, permaneciendo la temperatura en el valor T_2. Durante este proceso, se entrega al escape la cantidad de calor Q_2. Finalmente, continuamos comprimiendo el vapor (entre los puntos 4 y 1), pero sin permitir esta vez ningún intercambio de calor. La curva adiabática 4-1 completa el ciclo, restableciendo las condiciones iniciales de presión, volumen y temperatura. El trabajo total que se efectúa *sobre* el agente durante los dos últimos procesos está representado por la superficie gris 1-4-3-5-6-1. Si restamos el trabajo efectuado *sobre* el vapor del *producido* por éste, encontramos la superficie

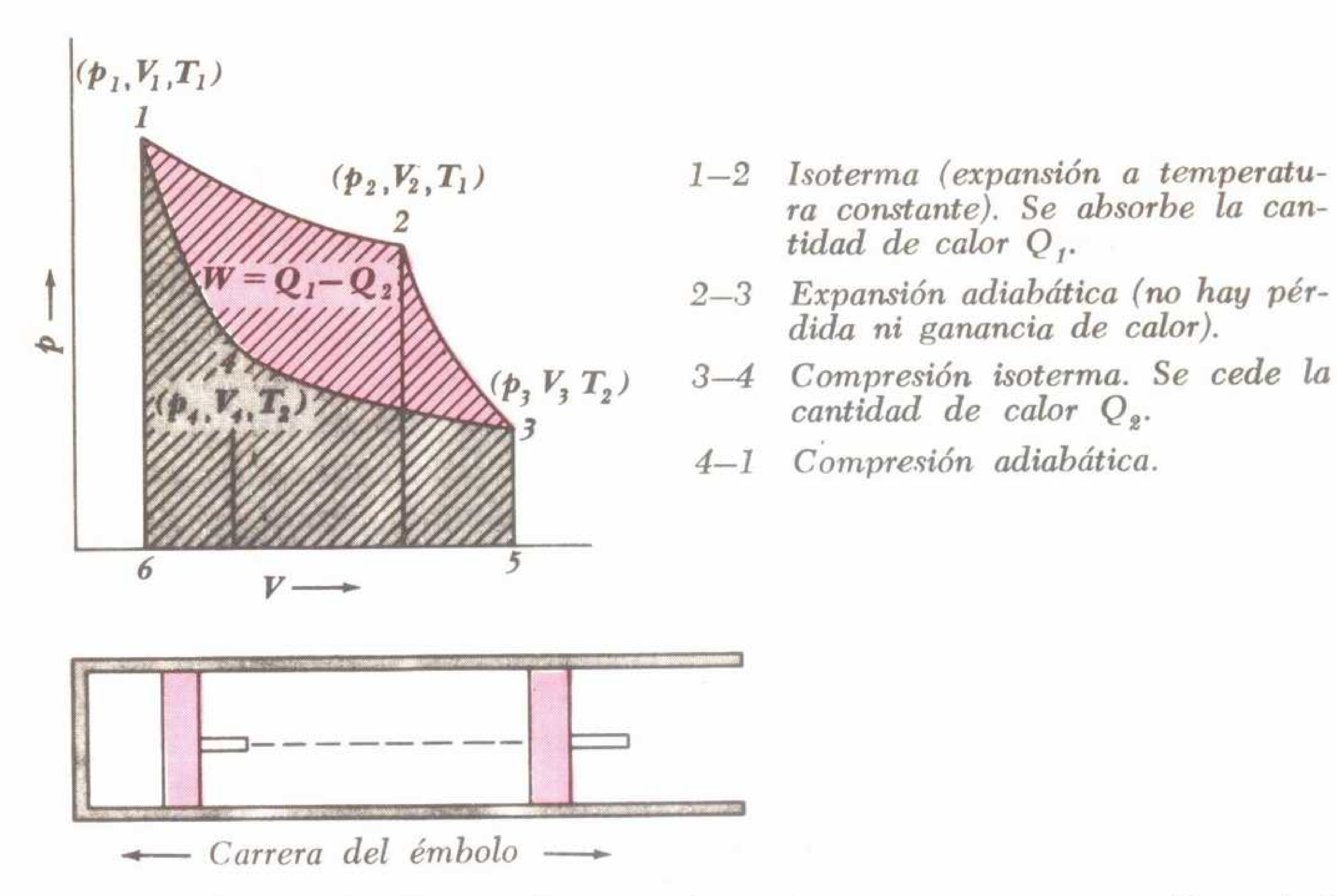


Fig. 5-5. Ciclo ideal o de Carnot (diagrama de presiones con respecto a volúmenes), limitado por dos isotermas y dos adiabáticas. El trabajo efectuado durante el ciclo es la diferencia entre el trabajo realizado por la expansión del vapor (superficie 1-2-3-5-6-1) y el trabajo efectuado sobre el vapor (superficie 1-4-3-5-6-1). La superficie coloreada (1-2-3-4-1) representa el trabajo útil.

1-2-3-4-1, que equivale gráficamente al trabajo útil realizado por la máquina durante un ciclo.

La fig. 5-6 representa un ciclo de Carnot tridimensional (*A-B-C-D-A*). Los ejes horizontales están graduados en volúmenes y temperaturas absolutas y el eje vertical en atmósferas de presión. El ciclo se ve en negro sobre la superficie curva blanca.

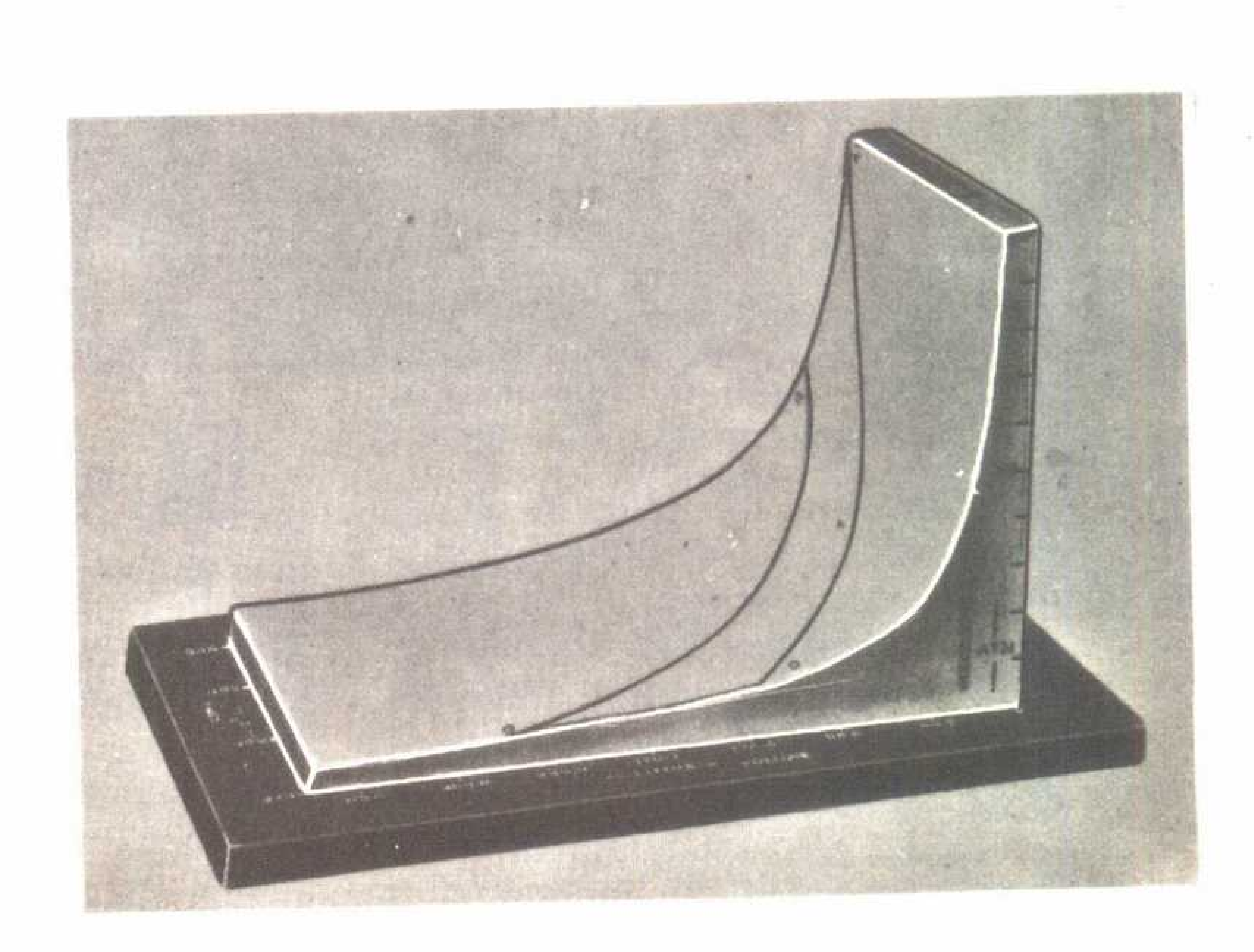


Fig. 5-6. Modelo tridimensional de ciclo de Carnot.

3 RENDIMIENTO EN EL CICLO DE CARNOT

Como que en este ciclo el agente activo vuelve a sus condiciones primitivas de presión, volumen y temperatura, no se gana ni se pierde energía dentro de la máquina. En consecuencia, W o cantidad de calor transformada en trabajo es igual a $Q_1 - Q_2$ y está representada por la superficie encerrada en el ciclo completo.

El rendimiento de la máquina ideal se expresa mediante la relación

$$n \text{ (rendimiento)} = \frac{W \text{ (trabajo cedido)}}{Q_1 \text{ (energía absorbida)}} \qquad (5\text{-}2)$$

o bien, puesto que $W = Q_1 - Q_2$,

$$n = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \qquad (5\text{-}3)$$

Podemos sustituir los valores de Q por sus correspondientes temperaturas absolutas o Kelvin (T) puesto que para un determinado cuerpo, la cantidad de calor es proporcional a su temperatura absoluta. El rendimiento del ciclo de Carnot toma entonces la forma

$$n = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \qquad (5\text{-}4)$$

que es siempre superior al rendimiento de cualquier máquina real.

• **Problema 2.** ¿Cuál es el rendimiento de una máquina ideal que trabaja según el ciclo de Carnot entre las temperaturas de 227° C (500°K) y 27° C (300°K)?

Solución.

$$n = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

$$= \frac{500 - 300}{500} = 0{,}4 \text{ o sea } 40\,\%.$$

El rendimiento de una máquina térmica puede aumentarse aumentando la temperatura T_1 en la caldera. (Es más difícil actuar sobre la temperatura de escape, T_2, que es o bien la temperatura ambiente para una máquina sin condensación, o la temperatura de la corriente de agua utilizada para condensar el vapor de escape.) La temperatura más elevada que se utiliza en las máquinas alternativas de vapor, es de 435° C y 620° C en las turbinas.

4 MAQUINAS DE VAPOR ALTERNATIVAS

En la primitiva máquina *Newcomen* (fig. 5-7) construida alrededor del año 1712 y utilizada principalmente para desagotar el agua de los pozos de ventilación de las minas de carbón, el émbolo efectuaba su carrera ascendente por la fuerza del vapor que admitía el cilindro. Se cerraba entonces la válvula de admisión, enfriándose el cilindro mediante un chorro de agua fría que condensando el vapor, hacía que la fuerza de la atmós-

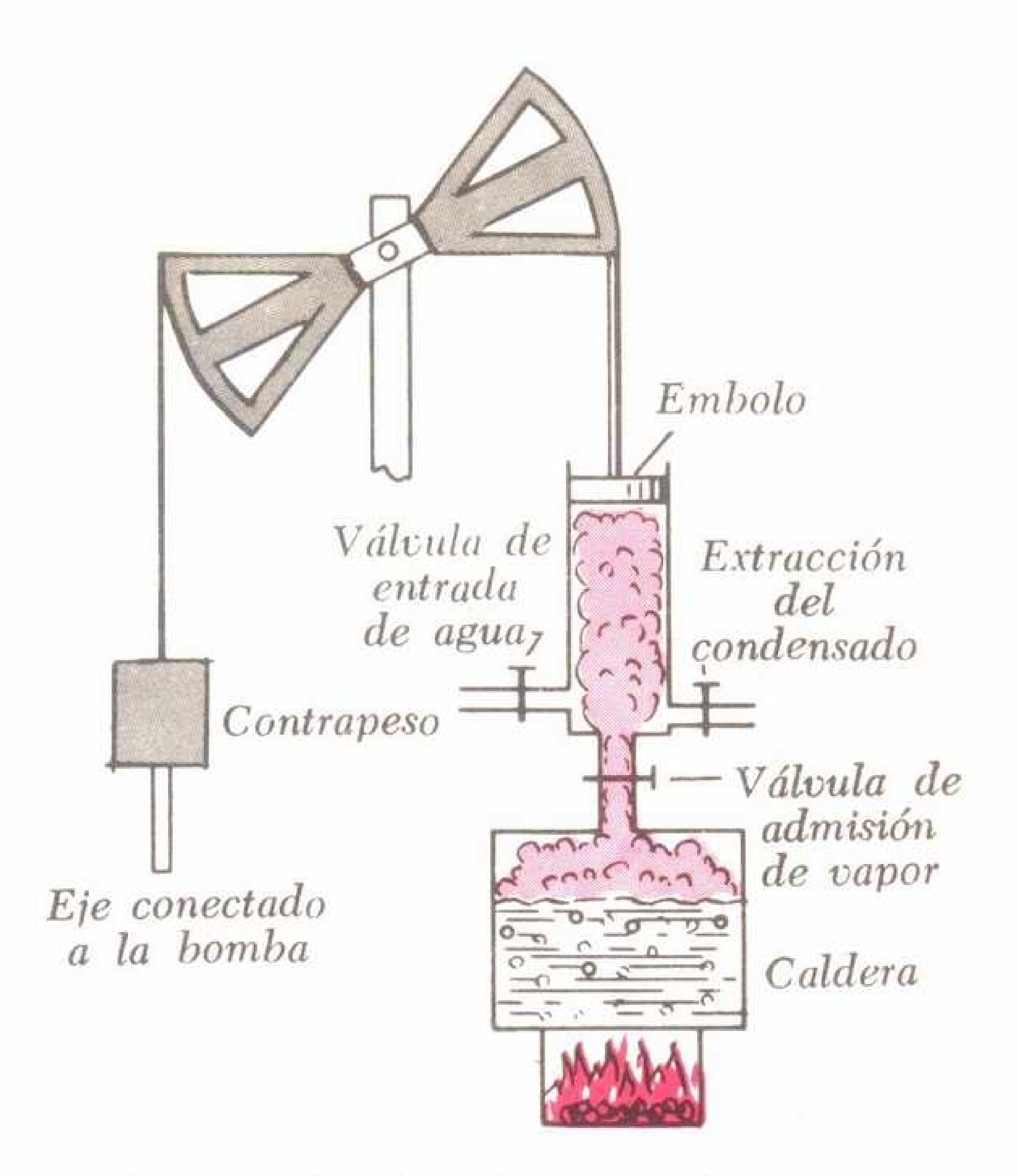


Fig. 5-7. Máquina de vapor Newcomen.

fera empujara al émbolo hacia bajo. Esta máquina era, por lo tanto, de *simple efecto* (efectuaba trabajo únicamente durante una carrera por cada ciclo). Las

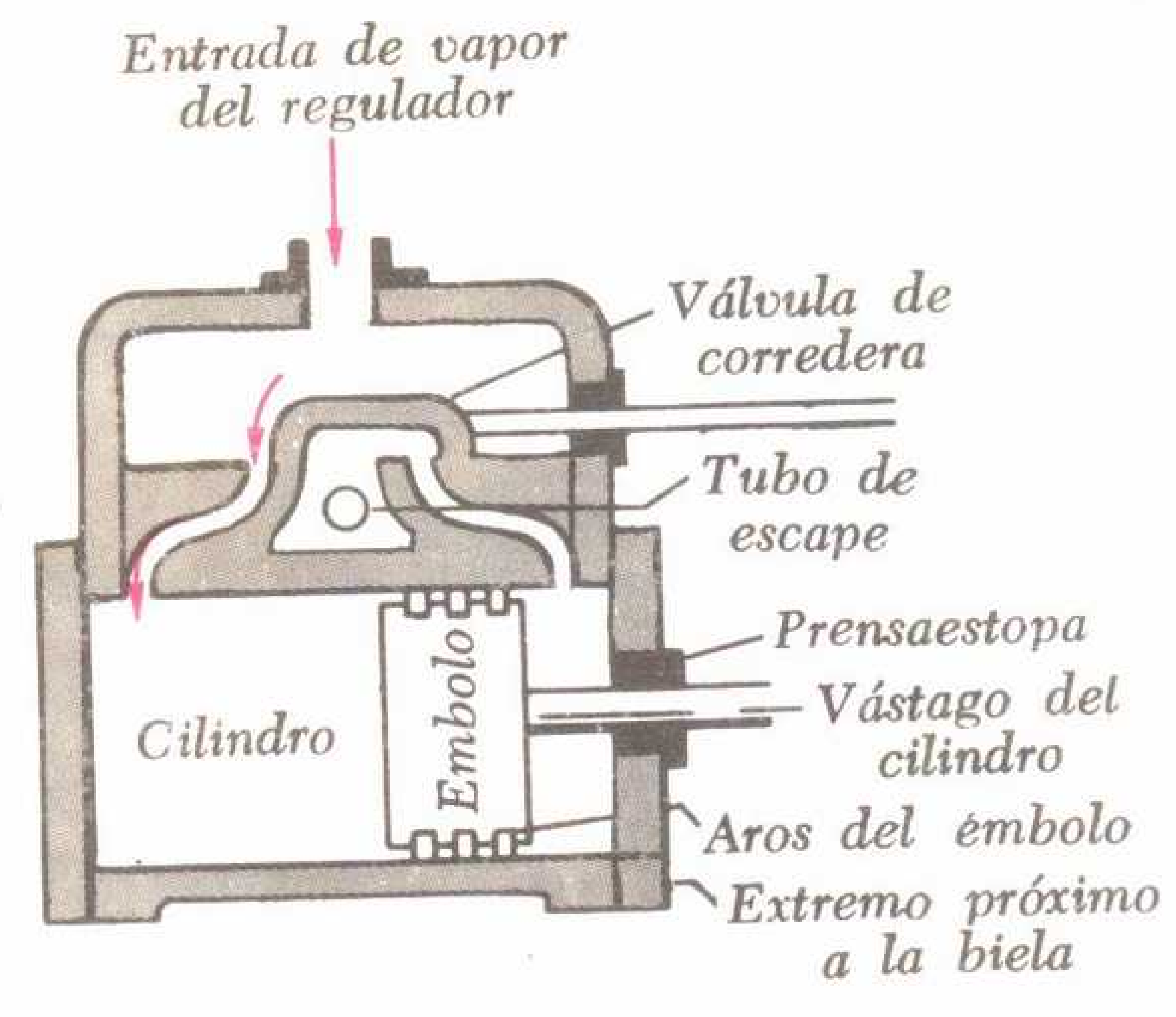
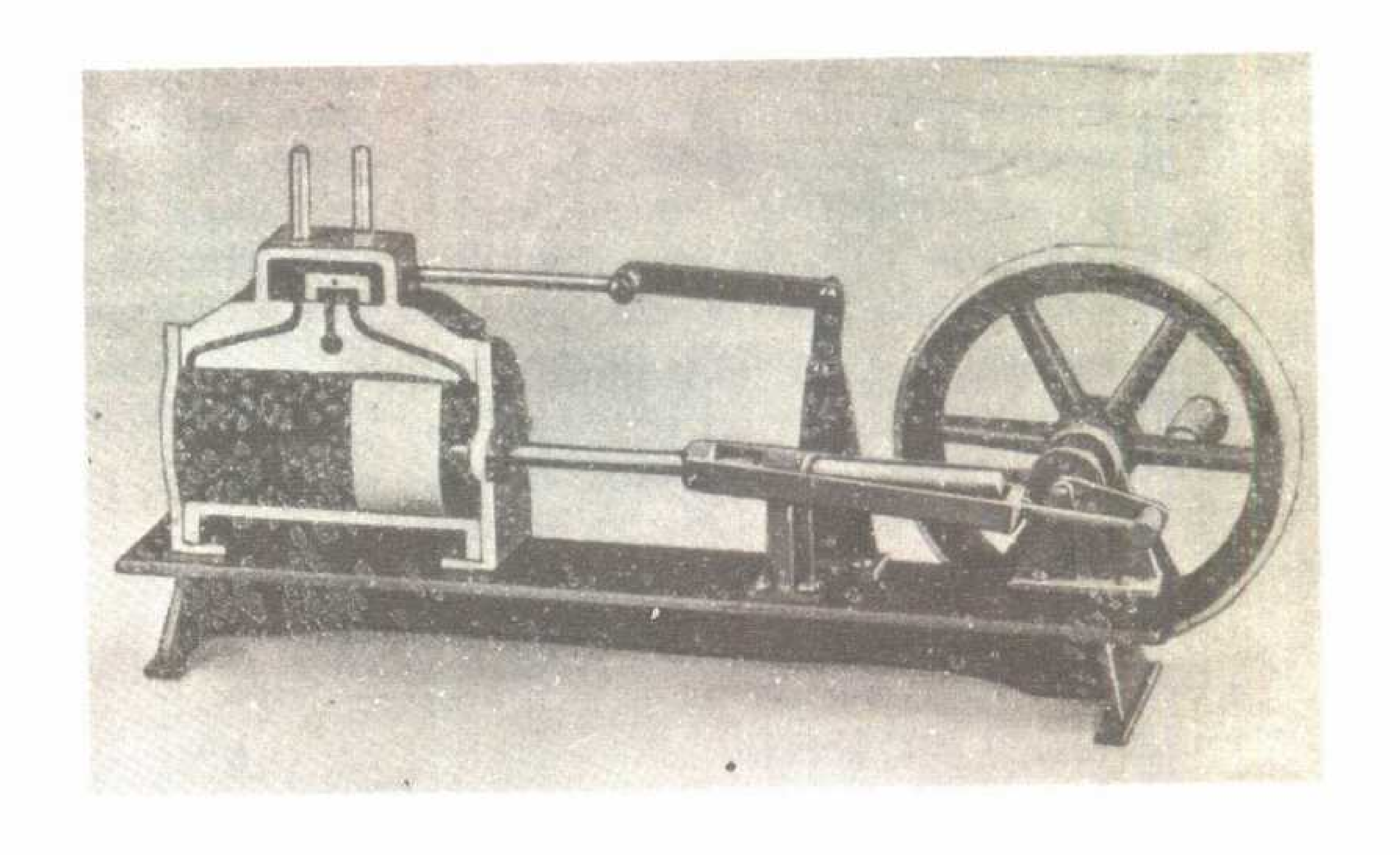


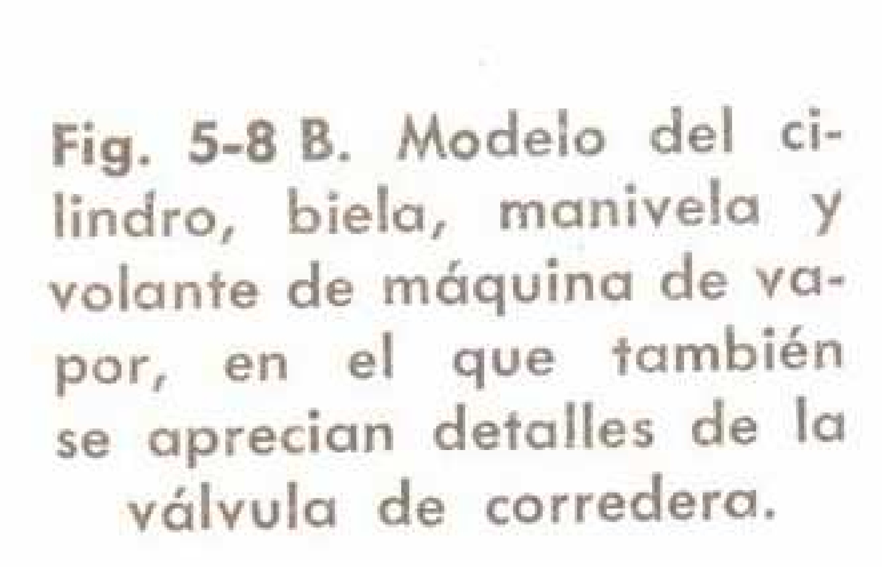
Fig. 5-8 A. Esquema del cilindro de una máquina de vapor.

al condensarse el vapor *dentro* del cilindro. También otras pérdidas, especialmente la debida a la *expansión incompleta*, ayudaban al bajo rendimiento de la máquina Newcomen. Esta consumía unos 9 kg de carbón por caballo-hora producido.

En 1763, el fabricante escocés de instrumentos Jaime Watt ideó la máquina de *doble efecto*, condensador exterior, regulador centrífugo de velocidad, la válvula de corredera (para regular la admisión de vapor desde la cámara al cilindro) y un procedimiento para obtener una más completa expansión del vapor, extrayendo así más energía del mismo. La presión del vapor era todavía muy baja en las primeras máquinas de Watt, al quedar limitada por la resistencia que entonces tenían las calderas. Watt logró disminuir el consumo de carbón, aproximadamente a 4,5 kg por caballo-hora.

La fig. 5-8 A representa esquemática-




Fig. 5-8 B. Modelo del cilindro, biela, manivela y volante de máquina de vapor, en el que también se aprecian detalles de la válvula de corredera.

válvulas que regulaban la dmisión de vapor y el agua fría, así como la descarga periódica del vapor condensado, se accionaban a mano en un principio, pero se cree que más tarde eran automáticas. La máquina, que con más propiedad podría denominarse "atmosférica", resultó poco eficaz debido a la baja temperatura y presión de la fuente, así como por la pérdida de energía calorífica que tenía lugar

mente el corte del cilindro de una máquina sencilla de vapor. En la fig. 5-8 B se ve un modelo de máquina de vapor. La válvula de corredera permite actuar alternativamente al vapor sobre una y luego otra cara del émbolo. El vapor de escape pasa directamente a la atmósfera, o se condensa *fuera* del cilindro, para aumentar el rendimiento.

La fig 5-9 muestra gráficamente el

funcionamiento completo de una máquina de vapor de condensación, aunque sin referirse a los detalles reales que se necesitan.

Las modernas máquinas alternativas (si bien en gran parte reemplazadas por las turbinas de vapor) todavía se construyen, algunas con potencias tan elevadas como 1.000 kW. Trabajan con vapor recalentado, emplean un vacío bastante elevado en el extremo correspondiente a la descarga y el vapor de escape de un primer cilindro pasa a otro de mayor diámetro donde continua su expansión,

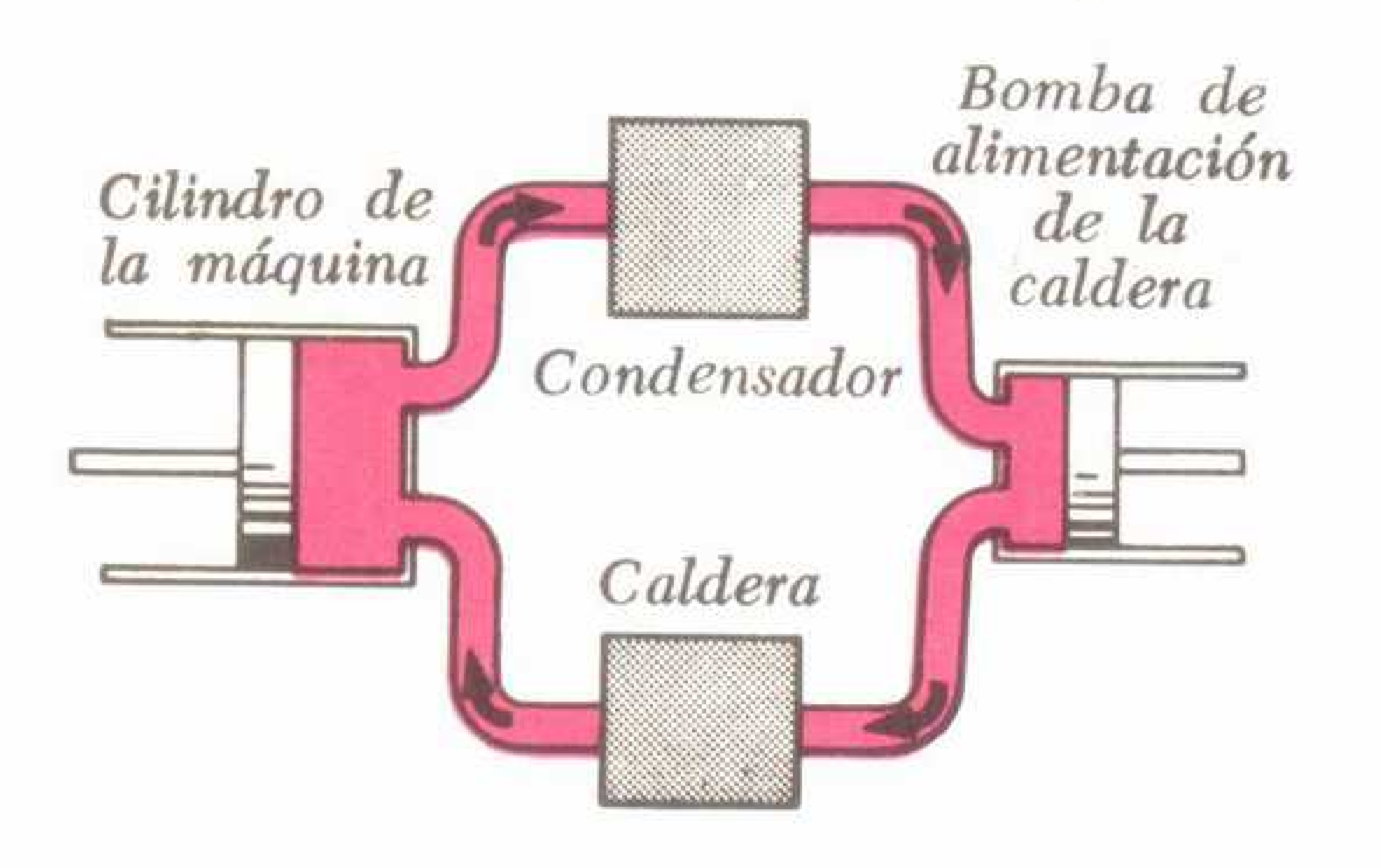


Fig. 5-9. Diagrama de funcionamiento de una máquina de vapor. (La bomba de alimentación inyecta el condensado a la caldera, para volver a utilizarlo.)

cediendo todavía energía. (Máquina *compound*). Se ha alcanzado un consumo de solamente unos 0,68 kg de carbón por caballo-hora, cifra que es todavía menor para las turbinas de vapor.

5 TRABAJO Y POTENCIA DE UNA MAQUINA DE VAPOR

Sea una máquina de vapor de doble efecto cuyo émbolo tenga una superficie de A cm², su carrera sea igual a L m, la presión eficaz media valga p kg/cm² y cuyo eje gire a N rps.

La fuerza ejercida sobre el émbolo durante una de las carreras, es igual al producto de la presión eficaz media por la superficie del mismo, o sea pA. Como esta fuerza recorre un camino igual a L metros, el trabajo efectuado por el vapor durante *una carrera* vale pAL kgm. El trabajo realizado *por segundo* será el producto $pAL \times 2N$, puesto que a cada revolución del eje cigüeñal de la máquina corresponden dos carreras en las que se produce trabajo. La potencia que se desarrollará en el cilindro de la máquina o *potencia indicada* será, en kgm/seg, $2pLAN$ y teniendo en cuenta que 1 CV = 75 kgm/seg, podremos escribir, llamando CV_i a la potencia indicada,

$$CV_i = \frac{2pLAN}{75} \qquad (5\text{-}5)$$

Para una máquina de simple efecto, la potencia indicada, para un cilindro, sería la mitad:

$$CV_i = \frac{pLAN}{75} \qquad (5\text{-}6)$$

La potencia al *freno* o potencia real producida por la máquina, se determina mediante el freno de Prony u otro dinamómetro. La relación entre la potencia al freno y la potencia indicada, es el *rendimiento mecánico* de la máquina. No debe confundirse con el rendimiento *ideal* (del ciclo de Carnot), que como sabemos se expresa mediante la relación

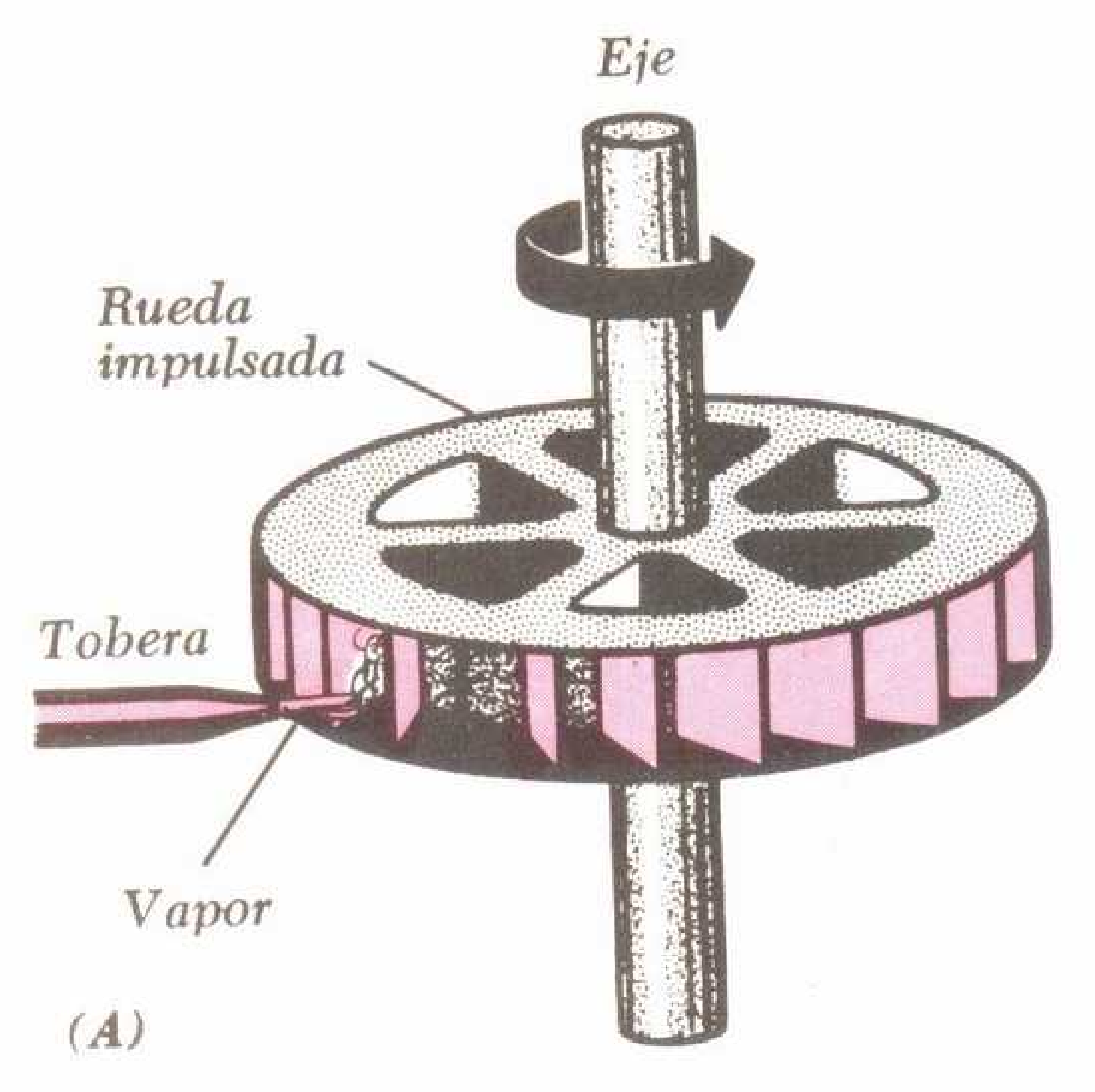
$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad \text{o bien} \quad \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

6 LA TURBINA DE VAPOR

La máquina de vapor alternativa —considerada como la fuente de energía de principios del siglo XIX— dio paso, a fines del mismo, a una máquina rotativa de alta velocidad y funcionamiento silencioso conocida con el nombre de *turbina de vapor*. No teniendo émbolos que invierten el sentido de movimiento, la turbina trabaja con un mínimo de vibración y ocupa menor espacio, a igualdad de potencia, que la máquina de ém-

bolo, más lenta. Las mejores turbinas de hoy alcanzan rendimientos de hasta 35 % consumiendo solamente unos 0,318 kg de carbón por caballo-hora.

En la turbina de una sola rueda ideada por Carlos de Laval en 1889 para utilizarla con un separador centrífugo de crema, varias *toberas* dispuestas alrededor de



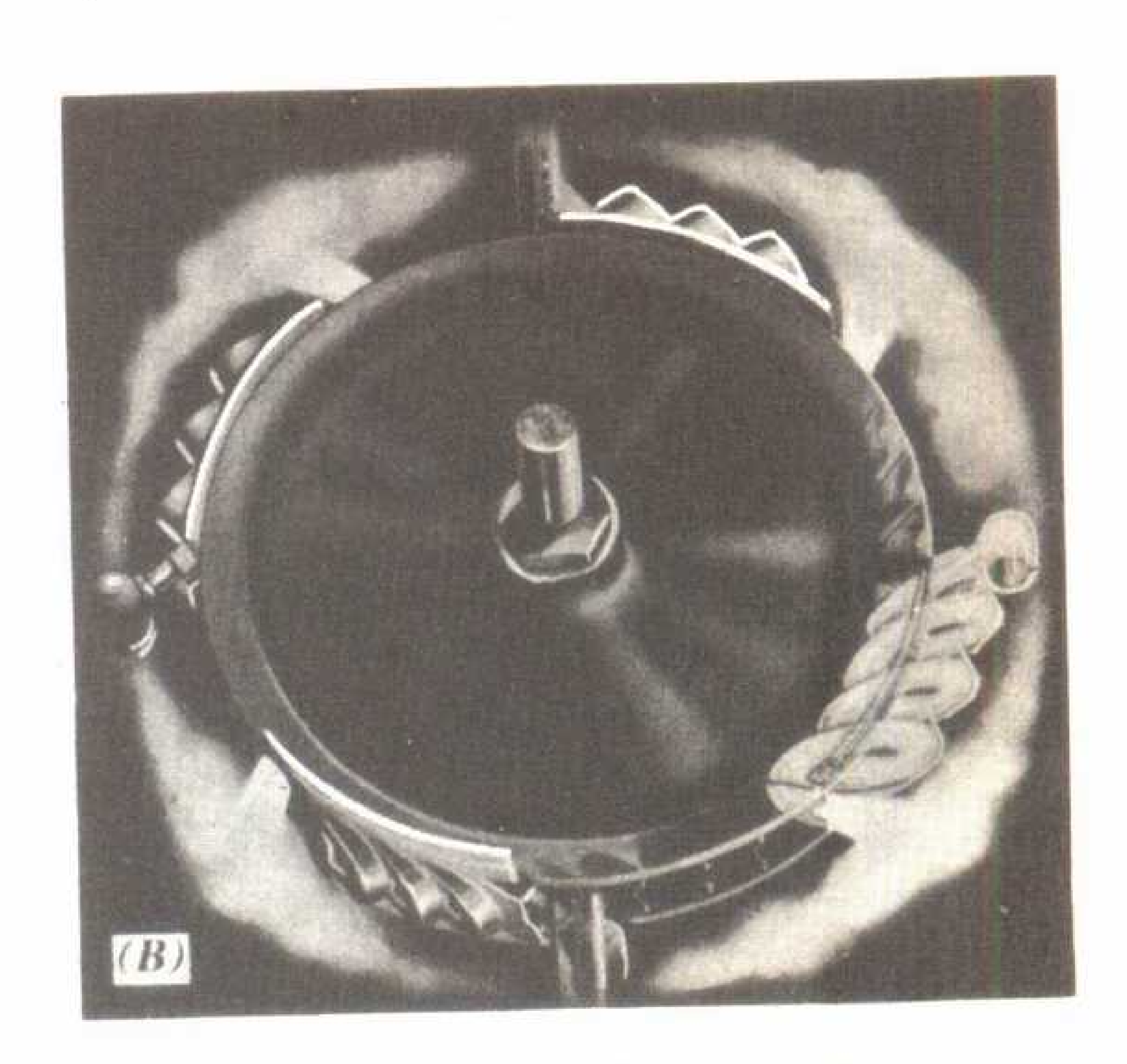


Fig. 5-10. (A) Turbina Branca y (B) acción del vapor sobre el rodete de una turbina.

El prototipo de la moderna *turbina de impulsión* es la *rueda de Branca* (fig. 5-10) inventada en la primera mitad del siglo XVII. El vapor se expansionaba saliendo por la boquilla fija cediendo su energía cinética a una serie de paletas dispuestas alrededor de la periferia de la rueda. El choque del vapor hacía girar la rueda.

la rueda o *rodete* lanzan chorros de vapor contra una serie de *álabes* incorporados en la turbina. En la fig. 5-10 parte (B) se ve el efecto del vapor sobre una turbina de impulsión de flujo helicoidal. Esta turbina tenía el inconveniente de adquirir velocidad demasiado elevada, no pudiendo entonces transformar eficazmente la energía cinética de los chorros de vapor

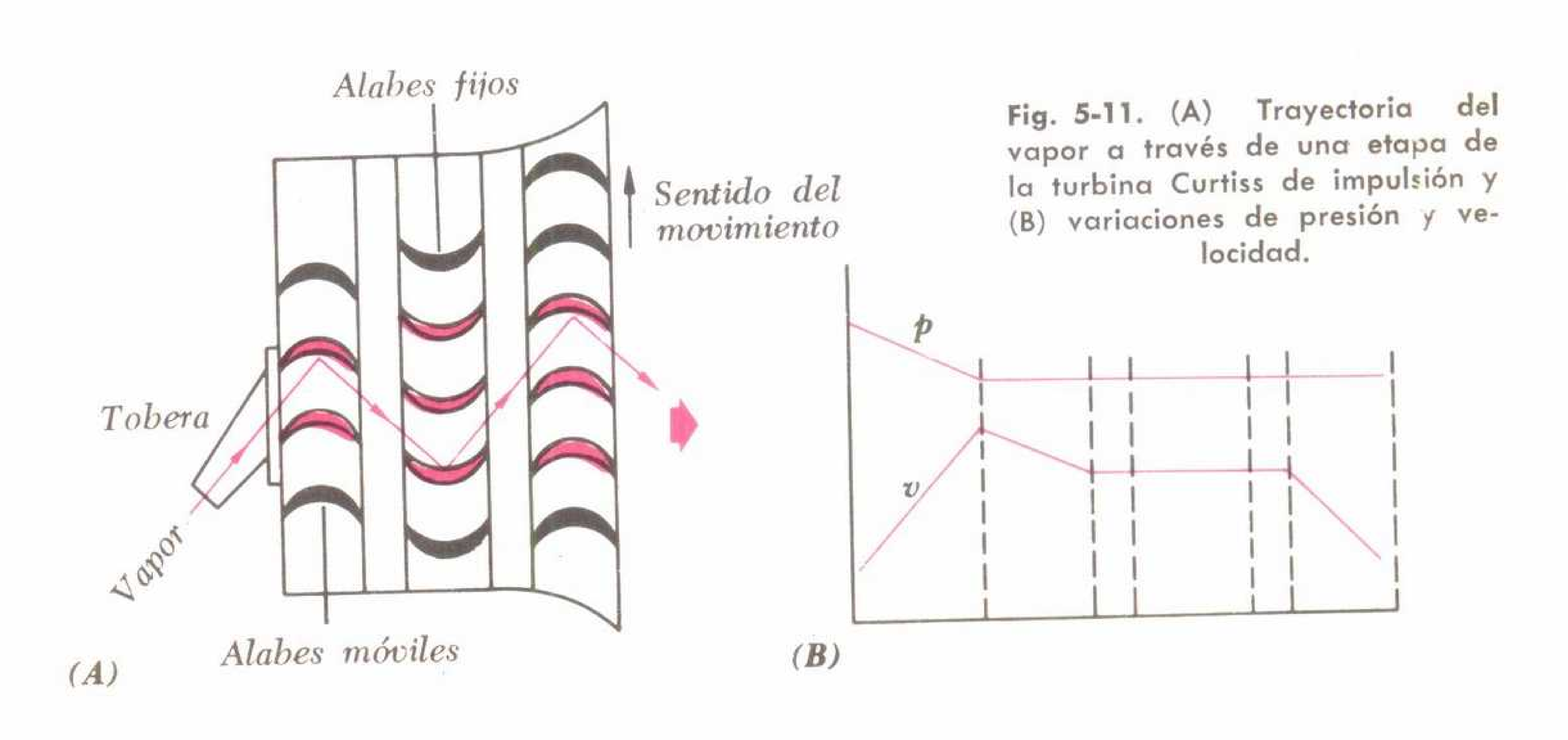


Fig. 5-11. (A) Trayectoria del vapor a través de una etapa de la turbina Curtiss de impulsión y (B) variaciones de presión y velocidad.

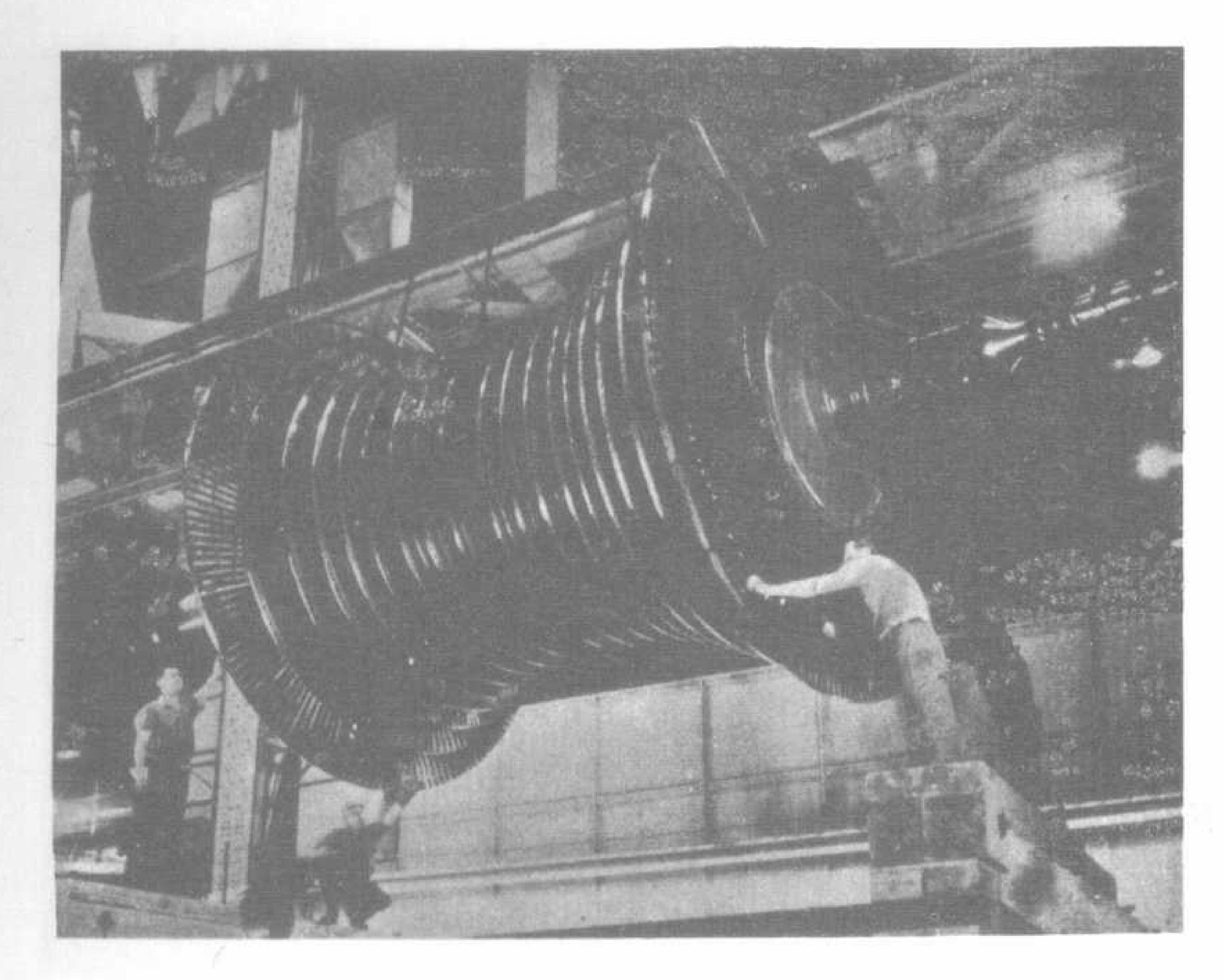


Fig. 5-12. Rotor de turbina de vapor de doble flujo.

en energía mecánica de rotación. Carlos Curtis solucionó el problema en 1896 mediante una turbina de impulsión de varias etapas que subdividía la velocidad del vapor entre varios grupos de álabes fijos y giratorios (fig. 5-11). Esto permitía extraer la máxima energía del vapor a menores velocidades de rotación que empleando un solo elemento. En el diagrama se ve cómo el chorro de vapor choca primero con los álabes giratorios, pasando a los álabes fijos y se desvía después hacia el otro conjunto de álabes giratorios. En el proceso, que muestra lo que ocurre en una etapa solamente, disminuye la velocidad del vapor a medida que pasa por cada conjunto de álabes. También se produce una constante disminución de pre-

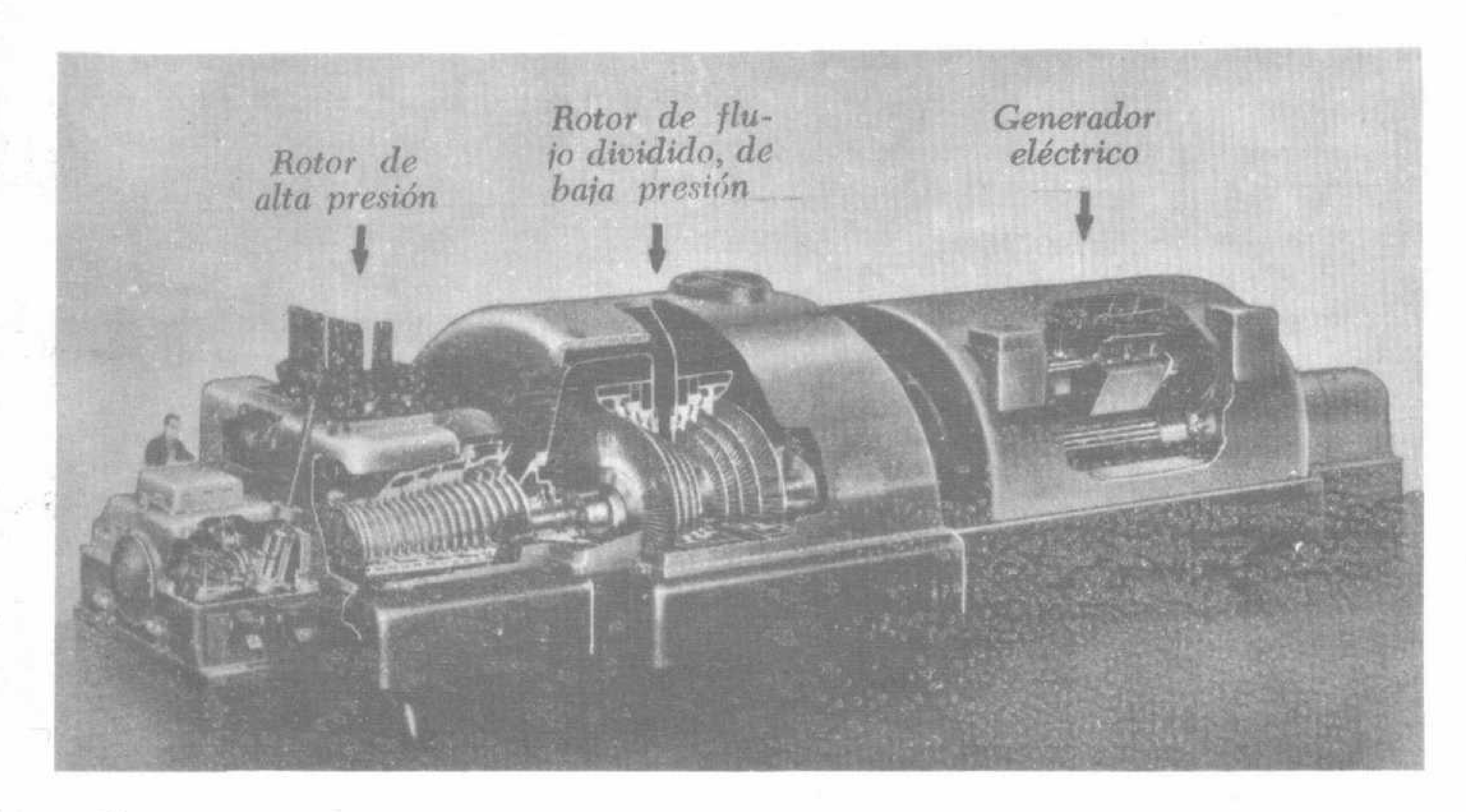


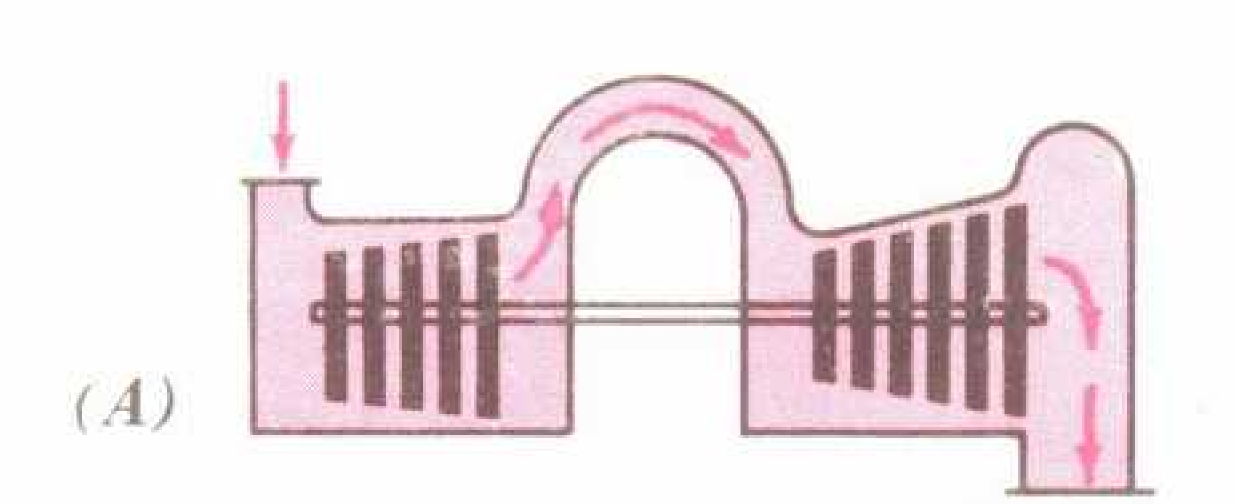
Fig. 5-13. Turbina de vapor tandem-compound acoplado a un generador eléctrico.

sión desde una etapa a la siguiente, por lo que los rodetes son de mayor diámetro hacia el extremo de escape.

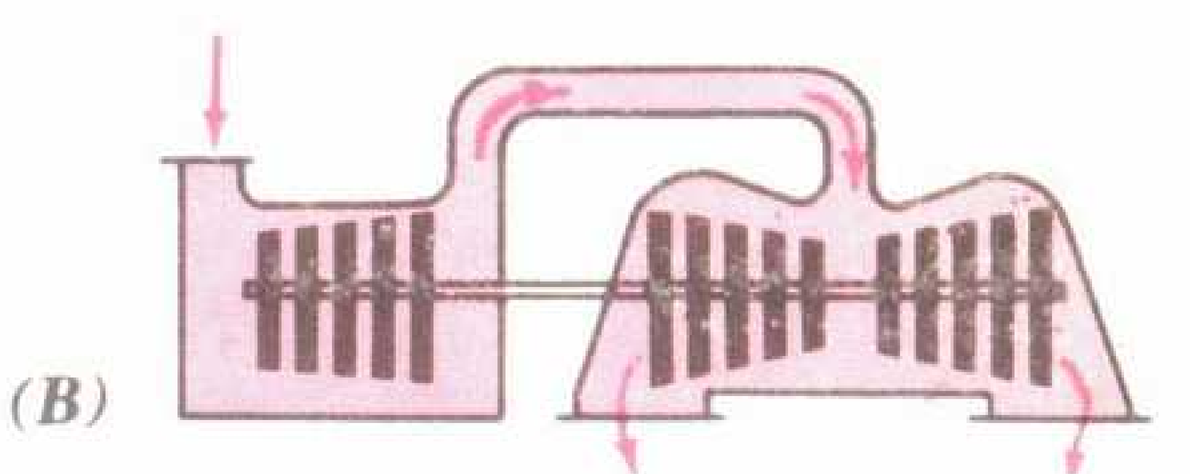
La fig. 5-12 muestra el rotor de una turbina de vapor de gran tamaño, de varias etapas y flujo dividido. Obsérvese que el tamaño de los rodetes aumenta considerablemente a medida que progresan hacia la derecha e izquierda a partir del centro, por donde entra el vapor. En la fig. 5-13 puede verse en corte las secciones *tandem-compound* de alta presión y

Las turbinas difieren en los métodos de combinación de sus etapas (en tandem o en oposición), en el sentido del flujo de vapor (único o doble), etapas de recalentamiento, presencia o ausencia de condensador externo, etapas de extracción del vapor para varios procesos, etc. En la fig. 5-14 se representan esquemáticamente varios tipos de turbinas.

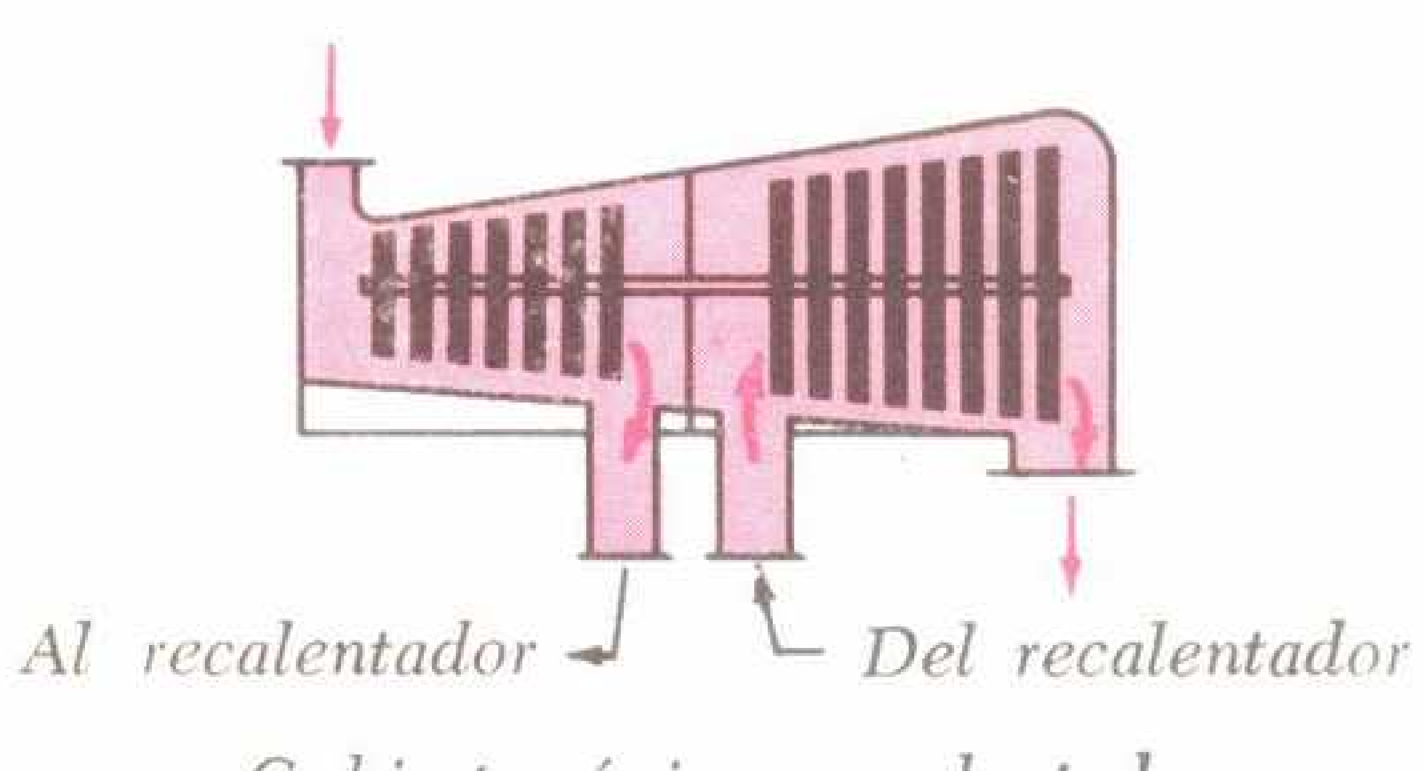
En las modernas tendencias con respecto al proyecto de turbinas, puede mencionarse la utilización de presiones ex-


(A)

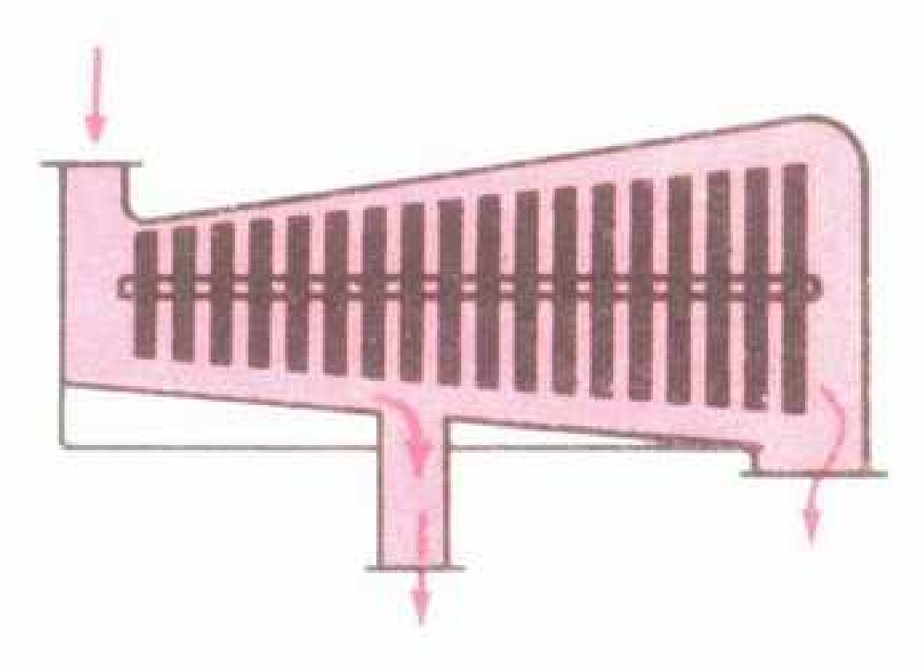
Tandem-compound de doble cubierta con paso externo.


(B)

Elemento de alta presión de circulación simple y elemento de baja presión de circulación doble.



Cubierta única, recalentador para una etapa
(C)



Una cubierta, extracción simple
(D)

Fig. 5-14. Diferentes tipos de turbinas.

de flujo dividido de baja presión, de una turbina (con un generador eléctrico acoplado). Obsérvese que la división del flujo que proviene de la última etapa del elemento de alta presión en dos pasos "paralelos" de baja presión, resuelve eficazmente el problema de la expulsión del vapor (puesto que en la última etapa de expansión se forman enormes cantidades de vapor de agua y vapor de agua húmedo). Cada paso del elemento de flujo dividido conduce solamente la mitad del volumen total de vapor, lo que permite reducir el tamaño de la máquina.

tremadamente altas (super críticas) que llegan hasta 340 kg/cm^2 y temperaturas para el vapor de agua que alcanzan los 650°C, esperándose que una sola unidad tendrá la potencia sin precedentes de 1.000.000 kW.

7 EL MOTOR DE GASOLINA DE CUATRO TIEMPOS

El tan ampliamente utilizado motor de combustión interna de gasolina se ba-

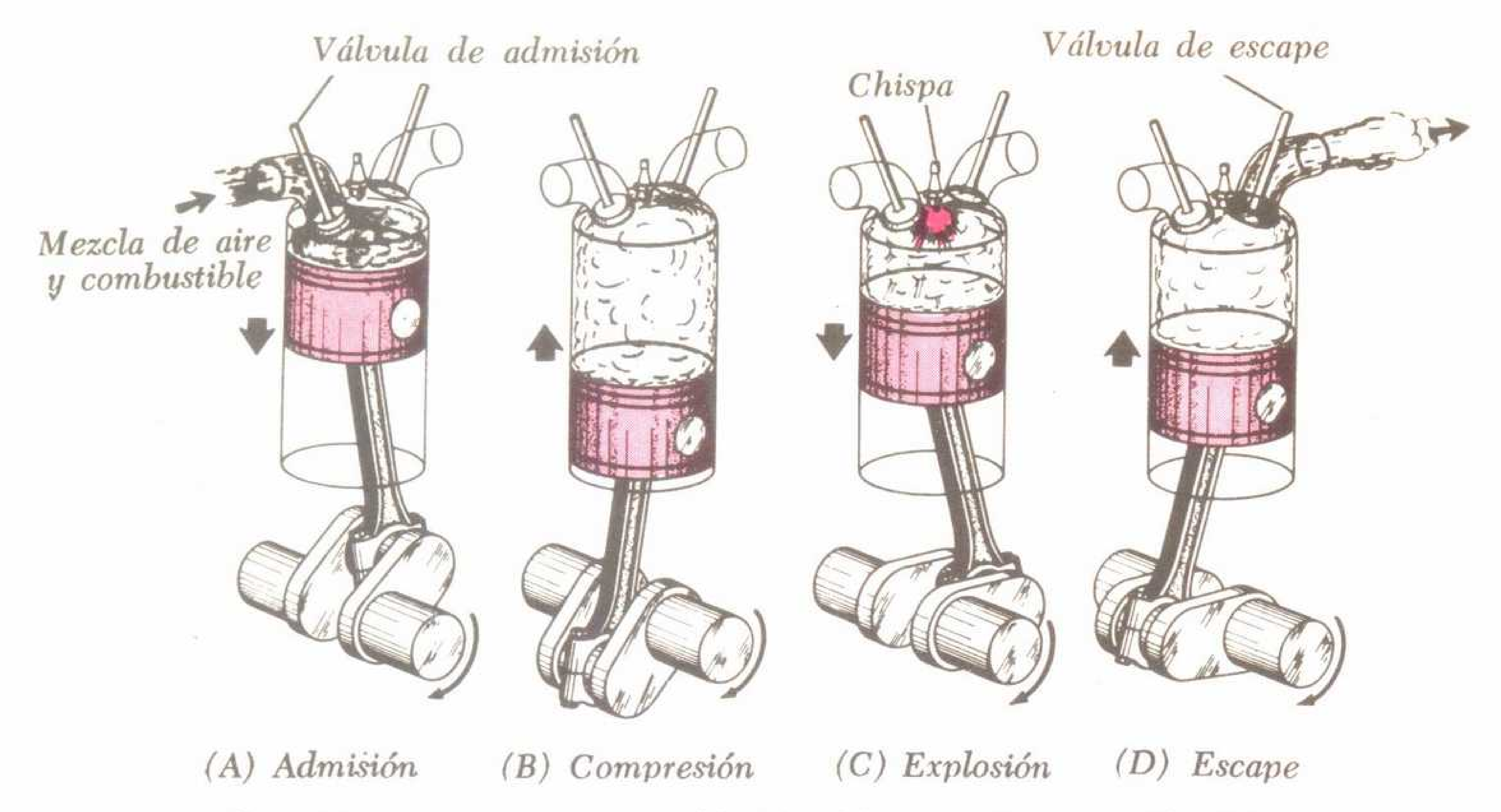


Fig. 5-15. Los cuatro tiempos del ciclo del motor Otto (simplificado).

sa en el principio establecido primeramente por N. A. Otto en 1876 y aplicado al automóvil por G. Daimler en 1885. Los cuatro operaciones sucesivas del ciclo de Otto (fig. 5-15) se conocen con el nombre de tiempos y son: *admisión, compresión, explosión* y *escape*.

El tiempo de admisión del motor de encendido por chispa, comienza con la entrada de la mezcla explosiva de vapores de gasolina y aire al tiempo que el émbolo inicia su carrera descendente a partir del punto muerto superior. Está abierta la válvula de admisión y cerrada la de escape. El émbolo vuelve ahora desde su posición más baja en el cilindro, comprimiendo la mezcla gaseosa desde aproximadamente 1 kg/cm² hasta 10 kg/cm² y aun más. Al llegar a la parte superior de la carrera, una chispa hace entrar en combustión la mezcla, que quema rápidamente y empuja el émbolo hacia

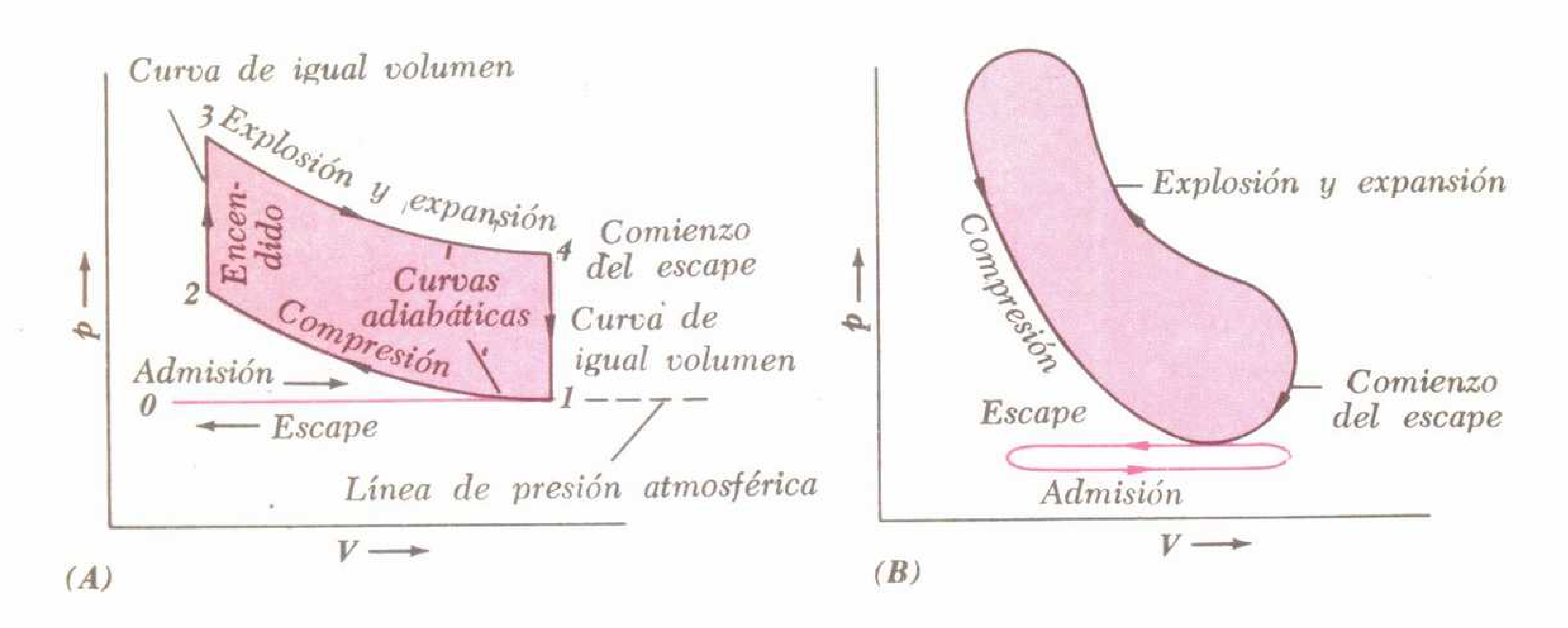


Fig. 5-16. Diagramas de presión con respecto al volumen correspondientes (A) al ciclo Otto ideal; (B) al ciclo real.

abajo con gran fuerza. (Las válvulas de admisión y escape están cerradas durante el tiempo de compresión y de explosión). Al retroceder el émbolo se abre la válvula de escape, expulsando a la atmósfera los productos de la combustión. En el ciclo siguiente se repiten los mismos tiempos.

En la fig. 5-16, parte (A), se representa el ciclo Otto ideal. La entrada de la mezcla combustible tiene lugar a presión prácticamente constante (atmosférica), según la línea 0-1. La compresión se efectúa adiabáticamente (sin pérdida ni ganancia de calor), siguiendo la línea 1-2. En el punto 2 sobreviene el encendido de la mezcla, tiempo indicado por la línea 2-3-4 que comprende la compresión sin

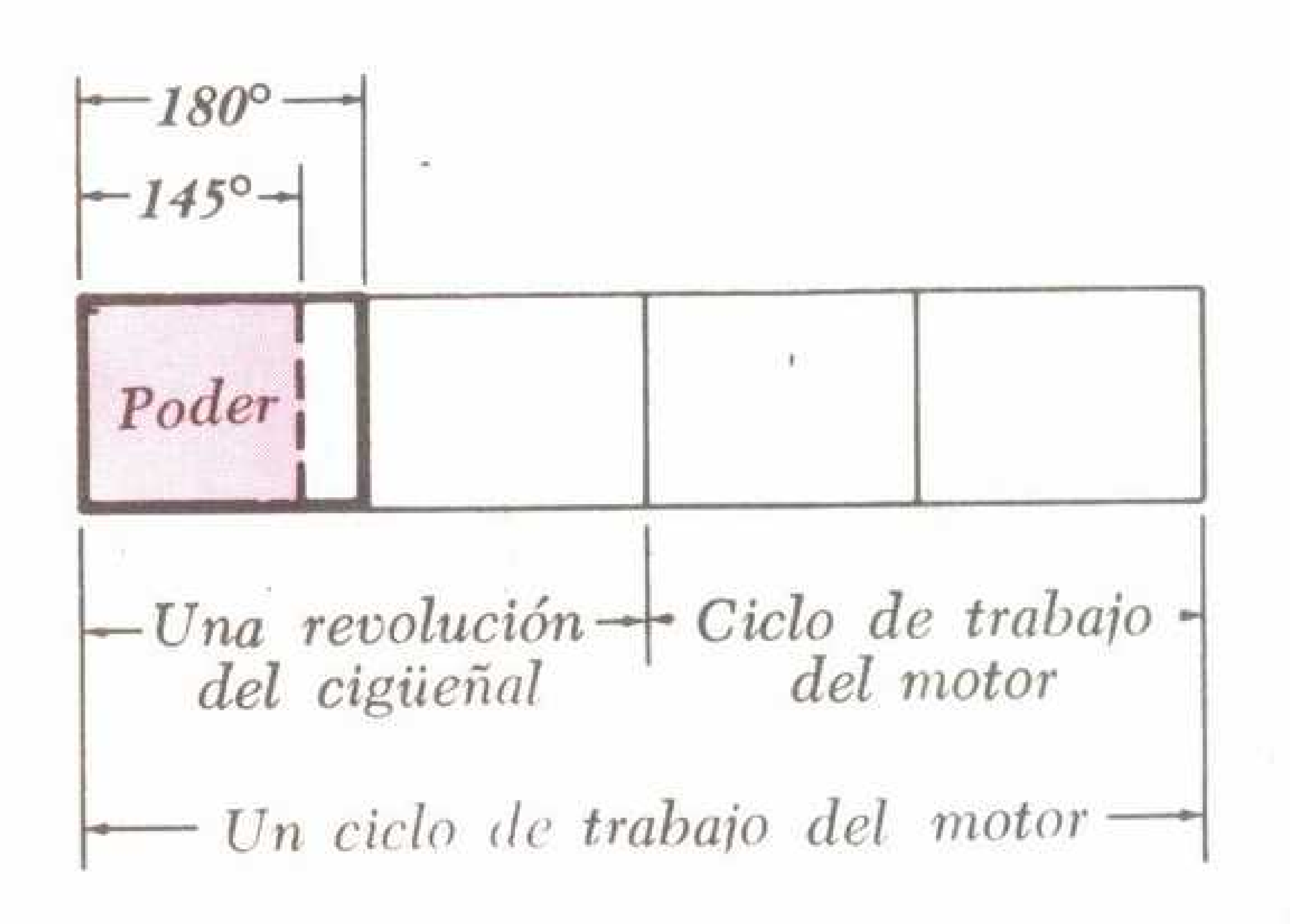


Fig. 5-17. Porción que genera energía dentro del ciclo completo del motor monocilíndrico de combustión interna. La superficie coloreada representa la porción real en que se obtiene energía; la línea gruesa limita la porción teórica en que debería obtenerse.

variación de volumen 2-3 y la expansión adiabática 3-4. En el punto 4 comienza el escape, cerrándose el ciclo mediante la línea 1-0.

En la fig. 5-16 parte (B) puede verse un diagrama real del ciclo del motor de combustión interna. Obsérvese cómo se aparta de la forma del ciclo ideal.

Es evidente que se necesitan dos revoluciones del cigüeñal para que se efectúe un tiempo de explosión. Por lo tanto, en un motor de gas de un cilindro, se desarrolla teóricamente energía durante un periodo de 180° dentro del total de 720° que corresponde al ciclo completo. En realidad, la válvula de escape se abre cuando se ha cumplido aproximadamente el 80 % de la carrera de explosión, con lo que el tiempo que produce energía se reduce a solamente 145° (fig. 5-17). (El volante suministra la energía necesaria para mantener el movimiento durante los restantes 575°.) A pesar del efecto compensador del volante, la potencia se obtiene en forma irregular, estando acompañado el funcionamiento del motor de una vibración excesiva.

Cuanto más cilindros tenga el motor, los tiempos de explosión abarcan mayor proporción dentro del giro total del cigüeñal, obteniéndose el flujo de potencia con mayor suavidad, experimentándose menos vibración. Con más de cuatro cilindros, hay superposición entre los tiempos de explosión si el encendido tiene lugar en el orden adecuado. Exigencias de ingeniería han determinado, en los EE.UU. de Norteamérica, la normalización de los motores de automóvil de 6 y 8 cilindros, con preferencia a los de 12 y 16 cilindros, más caros y complicados. Los cilindros

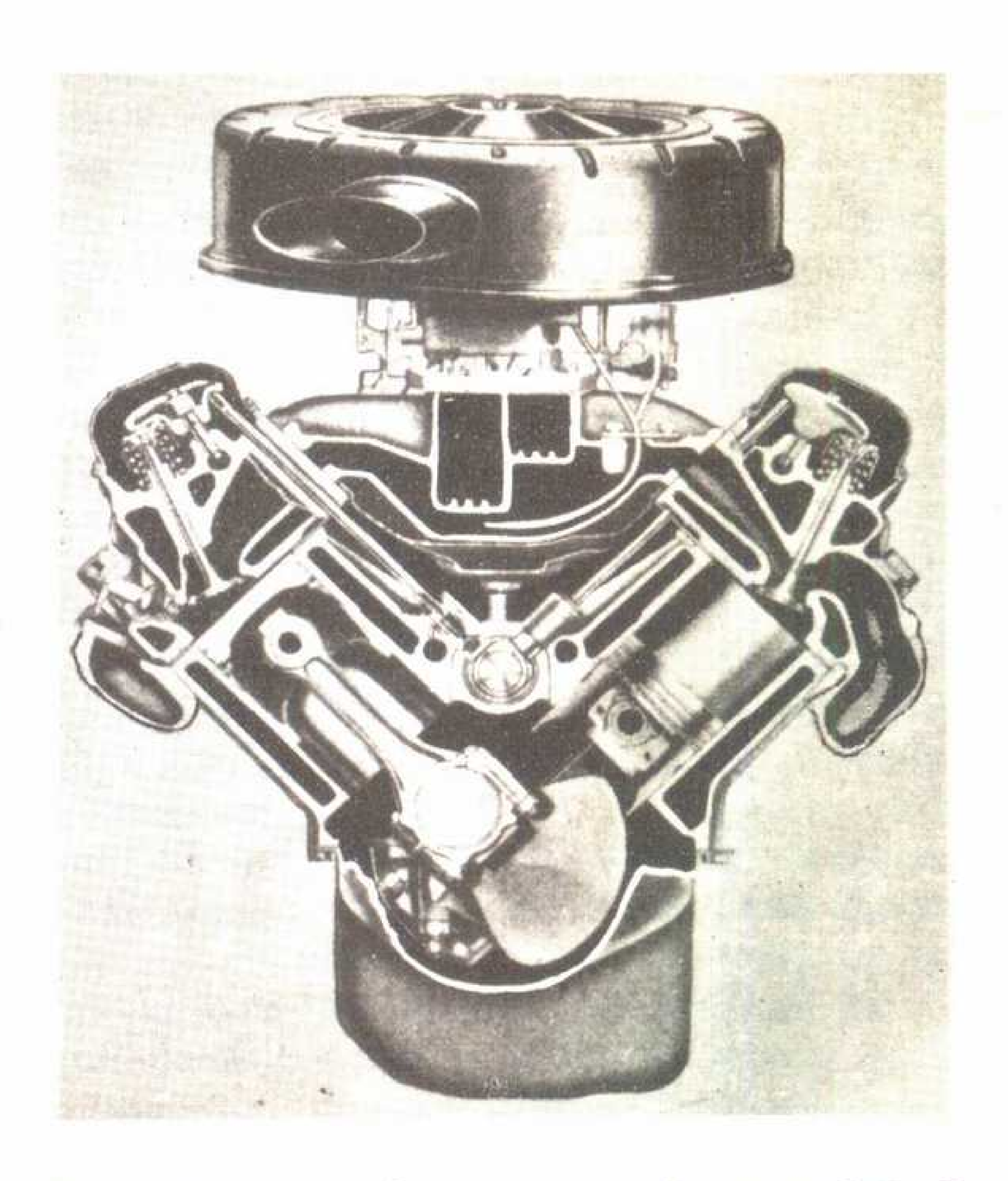


Fig. 5-18. Corte de un motor de automóvil, 8 cilindros en V.

acostumbran disponerse en *V*, como se aprecia en la fig. 5-18.

El empleo de varios cilindros hace posible disminuir el tamaño y peso de los elementos móviles del motor, a igualdad de desplazamiento. El consiguiente aumento en el número de tiempos de explosión que ocurren por minuto compensa la disminución del diámetro y recorrido de los pistones. Se obtiene en definitiva, mayor potencia con el mismo peso de motor.*

También el aumento del *índice de compresión* ha permitido mejorar mucho los motores.

Se llama índice de compresión a la relación entre los volúmenes máximo y mínimo de la mezcla gaseosa en el cilindro del motor de combustión interna. En los automóviles modernos se llega a índices de compresión del orden de 10 : 1. Los índices de compresión elevados aumentan el rendimiento térmico del motor, permiten obtener mayor potencia y disminuyen el consumo de combustible por caballo-hora. Se han proyectado motores experimentales con índices de compresión de 12 : 1 y aun más.

Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que una elevada relación de compresión acarrea el peligro de la *pre-ignición* o sea la explosión prematura de la mezcla gaseosa debido al calor desarrollado al comprimirla. La combustión se inicia en algún punto, fuera de la bujía y antes del momento en que debiera ocurrir. Esto da lugar al *pistoneo,* que además de introducir una pérdida de potencia, puede dañar realmente al motor. Para evitar este inconveniente, prácticamente todos los combustibles usados actualmente contienen cantidades variables de *tetraetilato de plomo,* $Pb(C_2H_5)_4$. Es un eficaz *antidetonante,* que aumenta el *número de octano* del combustible. Una mezcla de agua y metanol (alcohol metílico, alcohol de madera) es también un aditivo con excelentes propiedades antidetonantes.

El número de octano de un combustible se define como el tanto por ciento, en volumen, de iso-octano que contiene una mezcla de iso-octano y heptano cuyas propiedades antidetonantes son iguales a las del combustible dado. En general, la gasolina o nafta común tiene un número de octano igual a 90 y en la especial es de aproximadamente 97. Se considera que un motor experimental con índice de compresión de 12 : 1, necesita gasolina de 100 octanos (iso-octano puro) más un 0,1 ‰ de tetraetilato de plomo. Prolongando *hipotéticamente* la escala correspondiente al número de octano, a este combustible le correspondería un número igual a 103. Los combustibles utilizados en aviación pasan del valor 100, lo que se obtiene modificando la estructura molecular de los hidrocarburos que forman la gasolina.

El proyectista de motores de automóvil, debe tener en cuenta no sólo el número de octano que resultará adecuado para el motor que va a construir, sino que debe evitar que por disposición mecánica poco adecuada pueda tener lugar la detonación o pre-ignición. Esto se logra haciendo que en la cámara de combustión no existan puntos muy calientes que pu-



Fig. 5-19. Corte mostrando detalles de la cabeza del cilindro de un motor de automóvil.

* Existe un número óptimo de cilindros para cada clase de motor; aumentándolos más allá de este punto, disminuye la relación peso respecto potencia.

dieran provocarla apartará de la misma las válvulas, cuya temperatura puede ser muy alta, utilizará bronce y aluminio en la cabeza de los cilindros para disipar el calor de compresión, etc.). Se obtendrá así una combustión uniforme que puede efectuarse en el momento preciso ("puesta a punto"). Obsérvese, en la fig. 5-19, cómo se ha conseguido todo esto en un motor del año 1963.

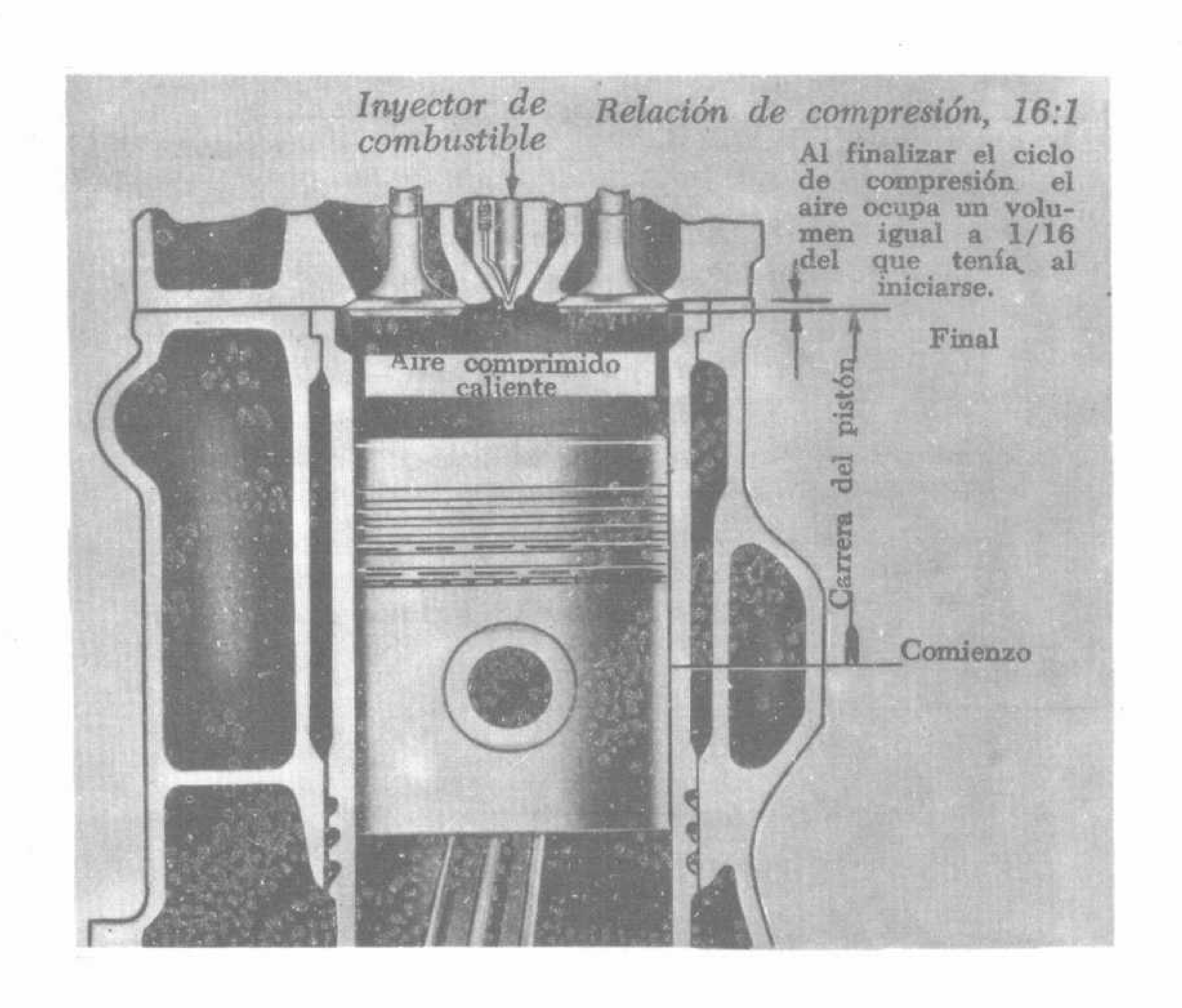


Fig. 5-20. Corte del cilindro de un motor Diesel (tiempo de compresión).

8 EL MOTOR DIESEL DE CUATRO TIEMPOS

En 1892, el ingeniero alemán Rodolfo Diesel patentó el motor que lleva su nombre. Diesel había previsto la posibilidad de logar la *auto-ignición* de un combustible dentro de una atmósfera de aire fuertemente comprimido. Los primeros motores de este sistema tenían una relación de peso a potencia de casi 114 kg/CV. Actualmente esta cifra es de 2,25 kg/CV para ciertos motores especialmente proyectados.

Al trabajar según el principio de compresión-encendido, los motores Diesel no necesitan sistema externo productor de chispa. Tienen buen rendimiento y al poder utilizar combustibles pesados, son más económicos que los motores de carburador. Hoy día constituyen la fuente principal de fuerza motriz para camiones y autobuses. En nuestro país, la casi totalidad de locomotoras tienen motor Diesel y el 90 % de ellas, en Norteamérica.

El peso de este motor impide aún su aplicación a la navegación aérea y tampoco puede generalizarse en los automóviles de turismo, en los que el motor trabaja a poca carga buena parte del tiempo, circunstancia que favorece al motor de carburador.

El motor Diesel de cuatro tiempos, admite solamente aire en el cilindro, comprimiéndolo según la relación 16 : 1 y más recientemente, 18 : 1 fig. 5-20). La temperatura alcanzada en la compresión, permite que el combustible finamente pulverizado, cuya inyección tiene lugar a una presión que puede llegar a 2.000 kg/cm^2, queme rápidamente, dando lugar a la ca-

rrera o tiempo de explosión, que produce energía. El ciclo termina con el tiempo de escape. El rendimiento *teórico* del motor Diesel es de 56 % y el rendimiento máximo *real* es del 35 %, aproximadamente.

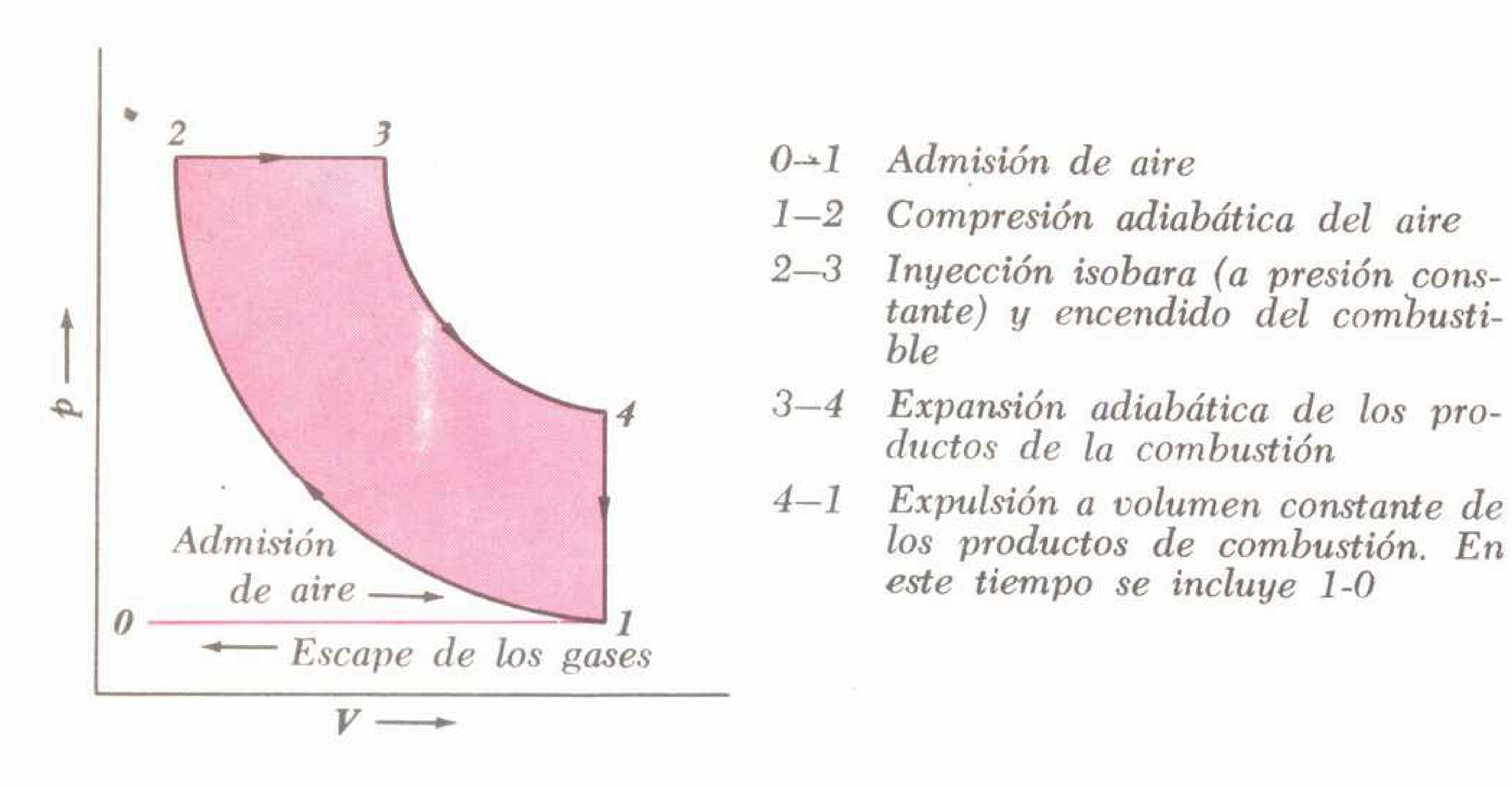


Fig. 5-21. Ciclo Diesel teórico.

En el ciclo Diesel ideal de cuatro tiempos (fig. 5-21), se admite aire en el cilindro, según la línea 0-1. Se comprime luego adiabáticamente, como representa la línea 1-2 hasta que la elevación de temperatura sea suficiente para hacer entrar en ignición al combustible. Este se inyecta en el punto 2, procediendo a quemarse a presión constante durante el tiempo 2-3. La expansión de los productos de combustión tiene lugar según 3-4 y la expulsión de los mismos sigue las líneas 4-1 y 1-0 del diagrama.

Aunque el motor Diesel está teóricamente exento de detonación o pistoneo, sucede a veces que el combustible quema con demasiada lentitud, dando por resultado una acumulación del mismo que se enciende más tarde de lo que debía haber hecho en condiciones normales. El aumento repentino de presión ocasiona un golpe audible. Así como el comportamiento del motor de carburador depende del número de octano del combustible, el del motor Diesel depende del tanto por ciento de *cetano* ($C_{16}H_{34}$). Cuanto mayor sea este porcentaje, tanto más rápidamente quema el combustible. Para los motores Diesel de alta velocidad, se recomienda un porcentaje de cetano superior a 50. Los motores de camiones y autobuses funcionan satisfactoriamente con combustibles cuyo porcentaje de cetano es inferior a 30.

9 MOTORES DE TURBORREACCION

El primer avión práctico de turborreacción fue proyectado en 1930 por el comodoro Frank Whittle, de la Real Fuerza Aérea Inglesa, quien pretendía un avión de caza cuya velocidad fuera por lo menos de 800 km/hr. (Estas velocidades no pueden alcanzarse mediante aviones de hélice.) Whittle empleaba un *compresor centrífugo de aire* que aumentaba la presión del que admitía el avión a través de una abertura en la parte anterior del motor. El aire comprimido pasaba a una *cámara de combustión,* a la que llegaba también el hidrocarburo líquido combustible, encendiéndose dentro de aquélla la mezcla de aire y combustible. Los gases calientes producto de la combustión se dirigían directamente sobre los álabes

de una *turbina de gas* montada sobre el mismo eje del compresor. La turbina devolvía la mayor parte de su energía mecánica al compresor, mientras que los gases calientes se descargaban a gran velocidad por la tobera de escape en la parte posterior del avión, comunicándole por reacción una intensa fuerza de propulsión hacia delante.

La fig. 5-22, parte (A), representa un corte simplificado de un turborreactor formado por un compresor axial de etapas múltiples y una turbina de gas también de varias etapas. En la fig. 5-22 parte (B) puede verse, en corte, un turborreactor completo, en el que se destacan detalles del compresor y de la turbina de gas.

El motor de turborreacción tiene muchas ventajas sobre el de pistón. Tiene menos elementos que el motor radial de

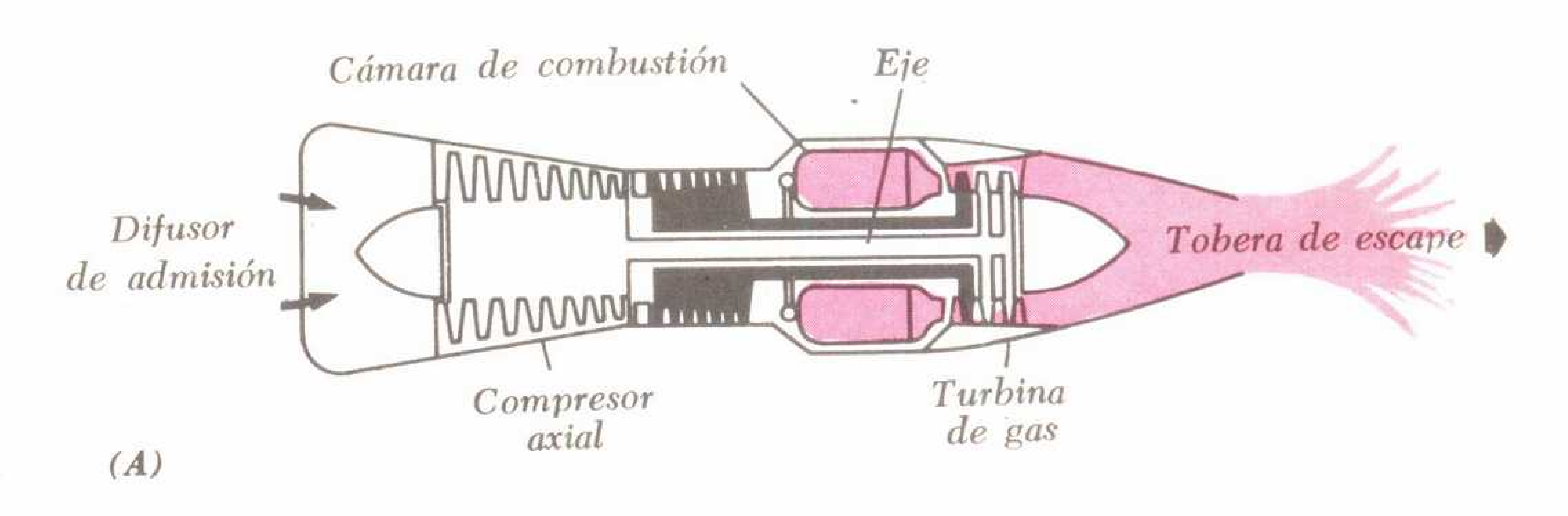


Fig. 5-22. (A) Corte de un motor de turborreacción. (B) Motor de turbohélice.

aviación, pesa proximadamente la tercera parte, a igualdad de potencia, produce ésta de manera continua, en lugar de hacerlo intermitentemente y funciona con mayor rendimiento a grandes altitudes sin necesitar voluminoso equipo de sobrealimentación. Su principal exigencia consiste en un combustible de mucha potencia calorífica y bajo punto de solidificación. Se le puede añadir a este motor otra sección, delante de la tobera de escape, en la que se inyecta más combustible, lográndose un empuje adicional del 60 % sobre el normal del motor. La inyección de agua también aumenta la potencia obtenida. Los aviones de turborreacción tienen poca resistencia frontal al avance y son muy eficaces dentro de las velocidades comprendidas entre 560 y 1.600 km/hr, pudiendo alcanzar altitudes de 18.000 metros. La potencia de estos motores se expresa en función del *empuje* (que acostumbra medirse en libras inglesas, debido a su procedencia) en lugar de hacerlo en caballos de vapor, si bien es fácil pasar de uno a otro método. Así pues, el motor J-79 de turborreacción tiene un empuje aproximado de 16.000 libras (7.260 kg) o una potencia de 64.000 Hp (65.000 CV) impulsando un avión a la velocidad Mach 2.

Debido a que el acero común no puede resistir la corrosión poducida por los gases calientes, en la construcción de los álabes de las turbinas se emplean aleaciones de níquel, cromo, cobalto, molibdeno, titanio y tántalo. Recientemente se aplican *recubrimientos cerámicos* a las partes metálicas para disminuir el desgaste y la corrosión. Estos nuevos materiales, mezcla de cerámica y carburos metálicos, han alcanzado gran aplicación.

10 EL MOTOR DE TURBOHELICE

Un motor de turborreacción al que se acopla una hélice común, se transforma en un motor de *turbohélice* (fig. 5-23), especialmente adecuado para la propulsión de bombarderos de gran radio de acción. El chorro de escape toma a su cargo aproximadamente el 25 % del empuje total; la hélice (acoplada mediante engranajes para que su velocidad sea menor que la del compresor) proporciona el 75 % restante. El motor de turbohélice consume menos, a igualdad de potencia, que el de tur-

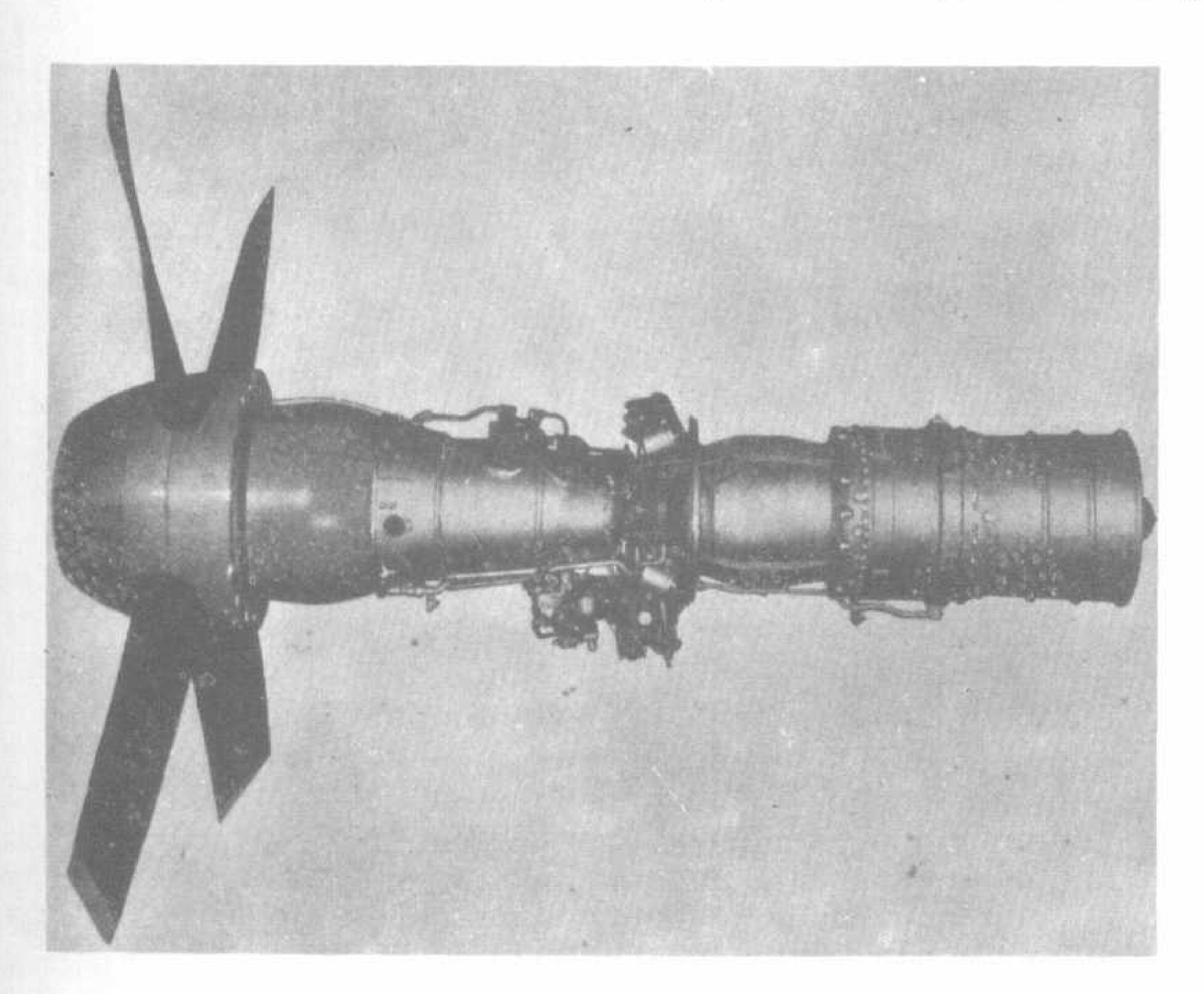


Fig. 5-23. Motor de turbohélice.

borreacción, pero no es apto para alcanzar las altitudes y velocidades elevadas en que tan bien se desempeña este último.

11 EL ESTATORREACTOR

Es otra forma de motor de reacción que se utiliza en la propulsión de proyectiles dirigidos de alta velocidad o *misiles* (velocidades entre 950 y 4.800 km/hr y altitudes hasta 24.400 m). El motor (que se muestra en corte en la fig. 5-24) es en esencia un conducto en que tiene lugar una combustión contínua. No tiene elementos móviles y su funcionamiento depende únicamente de su rápido movimiento a través del aire. Este entra por la abertura anterior y se mezcla con el combustible en ignición, manteniéndolo en continua combustión, expulsando a gran velocidad los gases quemados por la tobera posterior. Según la tercera ley de Newton, el momento lineal o cantidad de movimiento (producto de la masa por la velocidad) del escape es igual al producto de la masa del motor y avión por su velocidad, en sentido contrario. El estatorreactor debe alcanzar una velocidad por lo menos de 560 km/hr para que desarrolle suficiente presión de entrada para el funcionamiento.

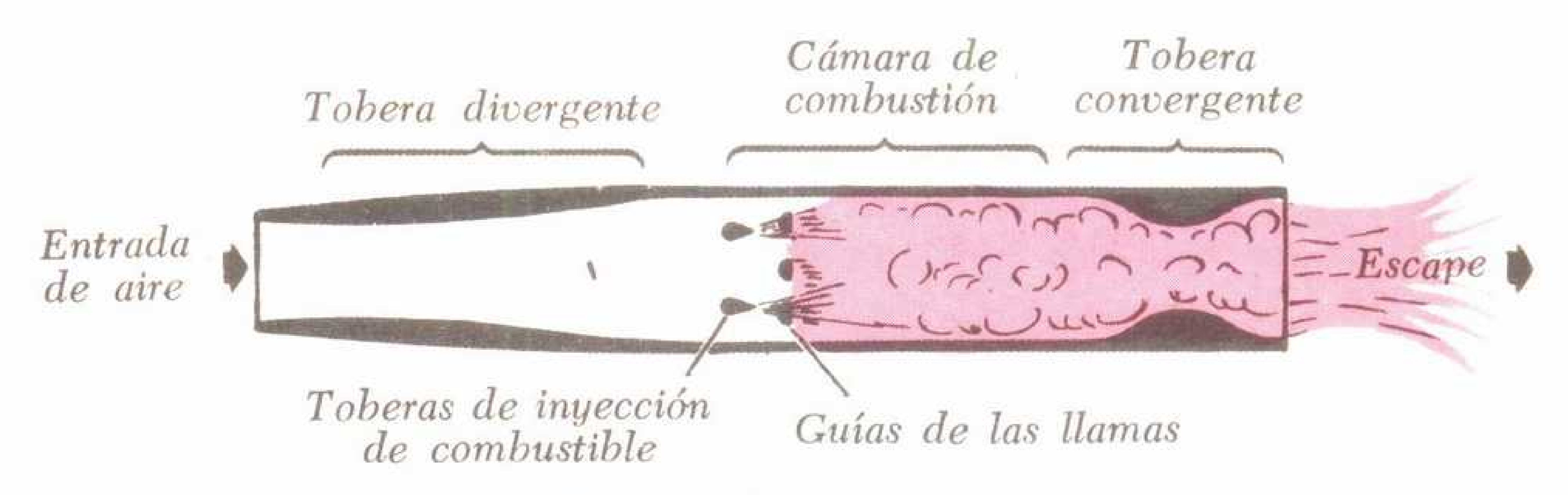


Fig. 5-24. Corte de un estatorreactor.

12 MOTORES COHETE

La fig. 5-25 muestra (en forma simplificada) el mecanismo de un motor cohete de alimentación química. A medida que el combustible entra en ignición y se mezcla con el oxidante en la cámara de combustión, se crea un momento hacia atrás por efecto de los gases de escape y un momento igual y opuesto hace avanzar hacia delante al motor. Al iniciar el vuelo, se mueve lentamente y bajo el punto de vista termodinámico tiene muy bajo rendimiento. A medida que gana altitud, es mayor la cantidad de energía suministrada por el combustible que pasa al cohete y menor la que recibe el escape. El cohete



Fig. 5-25. Esquema simplificado del corte de un cohete de una etapa para combustible líquido. El combustible del depósito A se combina con el oxidante contenido en B en la cámara de combustión C.

aumenta lentamente su rendimiento y desarrolla un empuje correlativamente mayor por kilogramo de peso del motor. La vida del cohete y su motor es muy breve.

Recientemente hubo gran interés en los sistemas de propulsión por cohetes, especialmente adecuados para viajes espaciales. Entre ellos se encuentra el cohete de *fisión nuclear,* el de *plasma,* el de *propulsión iónica* y otros, todos ellos en la fase experimental.

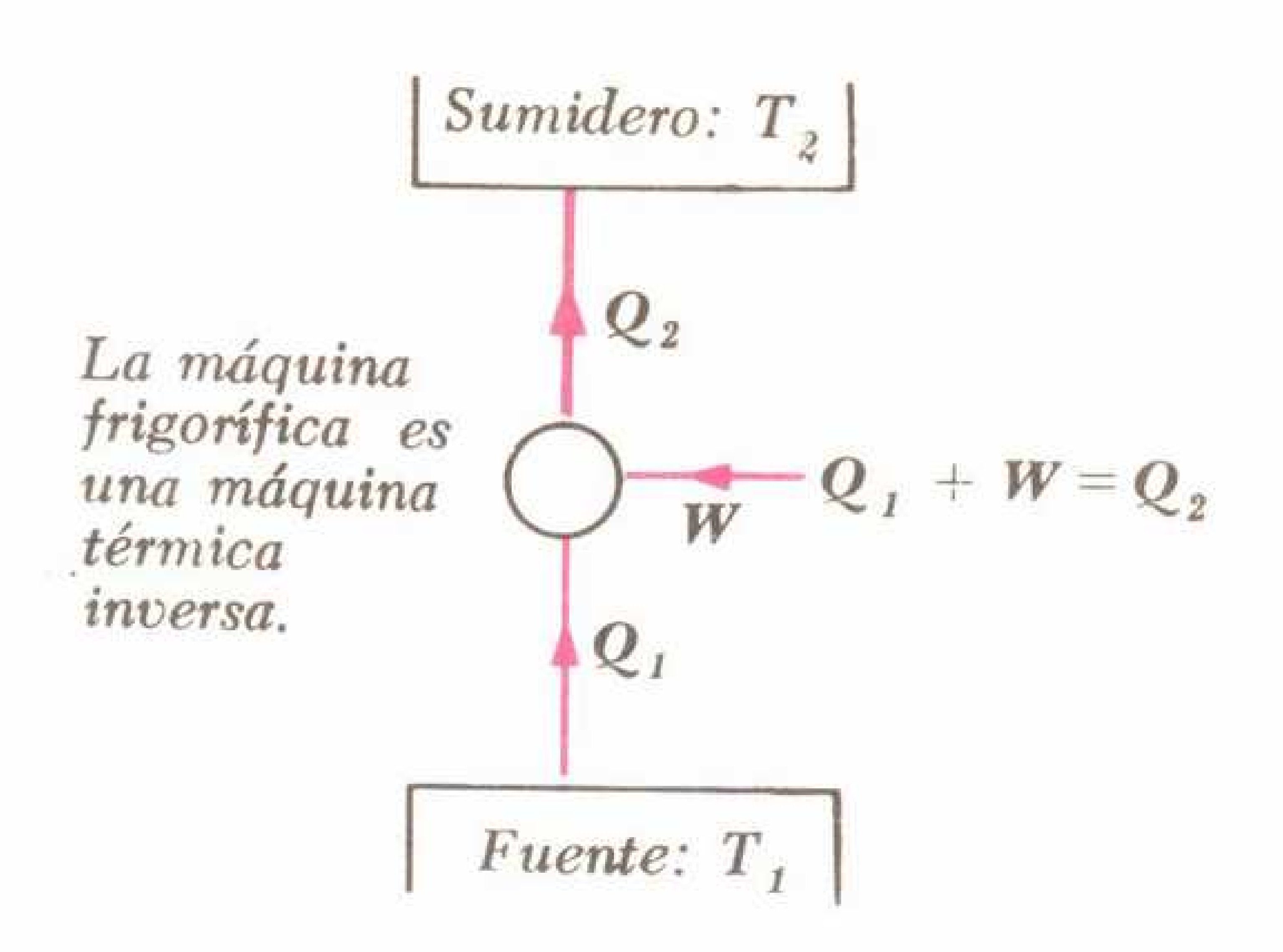


Fig. 5-26. Diagrama del flujo del calor en una máquina frigorífica.

13 UNA MAQUINA TERMICA INVERSA: EL REFRIGERADOR

El ciclo de la máquina frigorífica es en esencia el ciclo de Carnot a la inversa. En lugar de suministrar calor proveniente de una fuente a alta temperatura, transformando parte del mismo en trabajo mecánico pasando el resto al escape con menor temperatura, la máquina frigorífica admite calor a baja temperatura, haciendo pasar todavía mayor cantidad del mismo a un recinto con mayor temperatura. La diferencia entre el calor admitido y el cedido es el equivalente del trabajo mecánico efectuado por el motor del compresor (fig. 5-26). La cantidad de calor Q_1 entra a la temperatura T_1, haciéndose pasar al exterior la cantidad de calor Q_2 a la temperatura T_2. Q_1 es la cantidad de calor que se extrae mediante el sistema refrigerador; Q_2 es la cantidad de calor que pasa al aire ambiente. W representa la energía calorífica equivalente al trabajo realizado por el motor. Las magnitudes mencionadas se relacionan entre sí mediante la ecuación

$$Q_1 + W = Q_2 \qquad (5\text{-}7)$$

REPASO

Preguntas

1 Exprésense las leyes primera y segunda de la termodinámica. ¿Qué relación tiene cada una de ellas con el funcionamiento de una máquina térmica?

2 ¿Cuál era el error de Carnot con respecto a la máquina térmica? ¿Qué criterio sostenemos actualmente?

3 ¿Cuál es el equivalente mecánico en julios de una kilocaloría y de una unidad térmica inglesa?

4 Una máquina térmica de *ciclo cerrado* trabaja repetidamente con el mismo agente; una máquina de *ciclo abierto* requiere añadido periódico del agente. Clasificar según este criterio (a) la máquina de vapor con condensación, (b) el motor Diesel, (c) la turbina de gas.

5 ¿Qué se entiende por máquina de vapor "compound"? ¿Cómo se materializa esta disposición?

6 ¿Por qué un elemento de doble flujo y baja presión de una turbina permiten disminuir el tamaño de los rodetes, así como su velocidad de rotación?

7 ¿Por qué en una turbina el diámetro del rotor es mayor en el extremo del escape que en el de admisión?

8 En una turbina de vapor de presión extremadamente alta, el agua de la caldera se hace completamente invisible de repente, al alcanzar la presión crítica. Explíquese por qué.

9 Expóngase brevemente la importancia de la relación o índice de compresión en el motor de combustión interna. ¿Cómo puede aumentarse sin producir encendido prematuro?

10 Mediante dibujos sucesivos, hágase ver las diferentes etapas de trabajo en el motor de gasolina de cuatro tiempos y en el motor Diesel de cuatro tiempos.

11 Hágase ver, por medio de sencillos croquis, la diferencia entre un motor de turborreacción, de turbohélice y un estatorreactor.

12 ¿En qué se diferencia el cohete de otros motores de impulsión por reacción? ¿Qué ventajas tiene un cohete de varias etapas?

13 ¿Por qué puede considerarse que una máquina frigorífica es inversa de una máquina térmica?

14 Explíquese la diferencia entre proceso isotermo y adiabático en la máquina térmica ideal.

Problemas

1 Un proyectil de 30 g-masa tiene una velocidad de 1.000 m/seg. Expresar su energía cinética en unidades térmicas.

2 Un peso de 24 kg cae desde una altura de 50 m. Expresar su energía cinética máxima en kilocalorías.

3 Al frenar un vehículo mediante una fuerza constante de 120 kg, recorre 60 m antes de detenerse. ¿Qué cantidad de calor en k-cal se desarrolla?

4 ¿Cuál es el rendimiento térmico de una máquina ideal que trabajara según el ciclo de Carnot con un salto térmico desde 500°C hasta 10°C.

TABLAS

Punto de ebullición de gases en estado líquido (Presión atmosférica)

	°C	°K
Helio (He^4)	—268,9	4,2
Hidrógeno (H_2)	—252,7	20,4
Nitrógeno (N_2)	—195,8	77,4
Oxígeno (O_2)	—183,0	90,1
Anhídrido carbónico (CO_2)	—78,5	194,6
Amoníaco (NH_4)	—33,3	239,8
Anhídrido sulfuroso (SO_2)	—10,0	263,1

Propiedades térmicas de sólidos y líquidos

Sólidos

	Calor específico (cal/g °C)	Punto de fusión (°C)	Calor de fusión (cal/g)	Coeficiente de dilatación lineal (por °C)
Aluminio	0,22	659	94	24×10^{-6}
Cobre	0,092	1.083	49	17×10^{-6}
Oro	0,031	1.063	16	14×10^{-6}
Níquel	0,11	1.455	56	13×10^{-6}
Platino	0,032	1.774	27	9×10^{-6}
Plata	0,056	961	26	19×10^{-6}
Estaño	0,054	232	14	27×10^{-6}
Cinc	0,093	419	23	26×10^{-6}

Líquidos

	Calor específico (cal/g °C)	Punto de ebullición (°C)	Calor de vaporización (cal/g)
Alcohol etílico	0,46	78,3	204
Alcohol metílico	0,58	64,7	263
Tetracloruro de carbono	0,20	76,7	46
Eter	0,55	34,6	89
Mercurio	0,03	357,0	71
Agua	1,00	100,0	540

INDICE ALFABETICO

EL MUNDO DEL CALOR

Este libro trata los temas relativos a niveles energéticos, termometría, calorimetría, termodinámica, criogenia, intercambios de calor y cambios de estado, considerando al calor como una forma de energía y teniendo en cuenta el principio de conservación de la misma. El estudio de las máquinas térmicas abarca desde la máquina de vapor alternativa hasta las gigantescas turbinas modernas, turborreactores y cohetes.

La serie Hayden de Física Moderna, que se presenta en volúmenes de formato conveniente, abarca detalladamente los conocimientos actuales de cinco de las secciones más importantes en que puede dividirse esta ciencia: **Calor, Luz, Mecánica, Materia y Energía nuclear,** y **Sonido.**

Cada libro explica con claridad los principios y leyes fundamentales de cada una de aquellas ramas. Se tratan también los últimos descubrimientos y aplicaciones prácticas. Muchas fotografías adecuadamente elegidas y dibujos bien realizados ilustran los temas estudiados.

La precisión científica de estos volúmenes será muy bien recibida por quienes desean alcanzar un mejor conocimiento de la física y su innegable contribución al perfeccionamiento de nuestro mundo. Estudiantes y lectores ávidos de información encontrarán los datos que necesitan conocer, presentados en forma clara y concisa.

Alejandro Efron, ex Presidente del Departamento de Física de la Escuela Secundaria Stuyvesant, de la Ciudad de Nueva York, ha cumplido recientemente cuarenta y tres años de distinguidos servicios como profesor, administrador y científico. Figura hoy en la lista de **Hombres de Ciencia Americanos** y ha escrito artículos para las más importantes publicaciones científicas y educativas.

S. A. EDITORIAL BELL

Efron

EL MUNDO DEL CALOR

BELL

4